

Técnicas de multiplexación por división en el espacio (SDM): estudio e implementación

Autor: Ester Serrano Jiménez

Tutor: Laia Nadal Reixats

Profesor: Jose Antonio Morán Moreno
(*Área de Comunicaciones Ópticas*)

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Créditos/Copyright



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/)

Creative Commons:



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/)



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



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



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



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



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

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Técnicas de multiplexación por división en el espacio (SDM): estudio e implementación</i>
Nombre del autor:	<i>Ester Serrano Jiménez</i>
Nombre del colaborador/a docente :	<i>Laia Nadal Reixats</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	<i>01/2020</i>
Titulación o programa:	<i>Máster en Ingeniería de Telecomunicación</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Comunicaciones ópticas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave	<i>Multiplexación SDM, fibras de múltiples núcleos (MCF), fibras de múltiples modos (MMF), fibras de pocos modos (FMF), SSPROP, capacidad.</i>
Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras):	
<p>En este proyecto se estudian diferentes técnicas de multiplexación por espacio (SDM) aplicadas a la fibra óptica: fibras multinúcleo, fibras multimodo (concretamente, las fibras de pocos modos), fibras multielemento y fibras de cristal de banda prohibida fotónica de núcleo hueco. En primer lugar se hace una investigación del estado del arte de dichas técnicas y, después, se implementa una de ellas.</p> <p>Se utiliza como base una rutina desarrollada por la Universidad de Maryland llamada SSPROP, la cual es para fibras de un núcleo y un único modo (SSMF), y se modifica el código en Matlab para adaptarla a una de las técnicas SDM mencionadas anteriormente: las fibras de pocos modos (FMF).</p> <p>Por último, se analizan los resultados y las gráficas obtenidos en las simulaciones para extraer las conclusiones. El objetivo principal de este proyecto es estudiar y demostrar los beneficios de utilizar SDM en la fibra óptica.</p>	
Abstract (in English, 250 words or less):	
<p>In this project, different space division multiplexing (SDM) techniques applied to the optical fiber are studied: multicore fibers, multimode fibers (specifically, the few-mode fibers), multi-element fibers, and hollow core photonic bandgap crystal fibers. First, the state of the art of those techniques is investigated and then one of them is implemented.</p> <p>As a basis is used a routine developed by the University of Maryland called SSPROP, which is for single-core and single-mode fibers (SSMF), and then the code in Matlab is modified to adapt it to one of the SDM techniques mentioned above: few mode fibers (FMF).</p> <p>Finally, the results and the graphs obtained in the simulations are analyzed to extract the conclusions. The main objective of this project is to study and demonstrate the benefits of using SDM in optical fiber.</p>	

Agradecimientos

Quiero agradecer sinceramente a mi tutora, Laia Nadal, por toda su ayuda, consejos y guía durante estos meses, lo cual ha hecho posible que este proyecto se lleve a cabo.

En lo personal, agradecer el apoyo sincero e incondicional de mi familia, mis padres, que siempre están ahí escuchándome aunque no entiendan del todo que hago. Y en especial a mi sobrina, Cayetana, y a mi abuelo, Rafael.

También a mis amigos, con los que me divierto, me distraen y con lo que puedo desahogarme en momentos de estrés.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	9
1.1.	Contexto del trabajo	9
1.2.	Objetivos	9
1.3.	Plan de trabajo	10
2.	ESTADO DEL ARTE	12
2.1.	Introducción a la fibra óptica	12
2.2.	Modos de propagación por la fibra óptica	13
2.3.	Tipos de multiplexación	16
2.3.1.	Multiplexación por división en frecuencia (FDM) y longitud de onda (WDM)	16
2.3.2.	Multiplexación por división en tiempo (TDM)	17
2.3.3.	Multiplexación por división de código (CDM)	17
2.3.4.	Multiplexación por división en el espacio (SDM)	18
2.4.	Tipos de fibra óptica	18
2.4.1.	Fibra multi elemento (<i>multi element fiber</i> , MEF)	19
2.4.2.	Fibra multi núcleo (<i>multi core fiber</i> , MCF)	19
2.4.3.	Fibra de pocos modos (<i>few modes fiber</i> , FMF)	21
2.4.4.	Fibra de cristal de banda prohibida fotónica de núcleo hueco (<i>hollow core photonic bandgap crystal fibers</i> , HC-PBCF)	22
2.5.	Dispersión y efectos no lineales de la fibra óptica	23
2.5.1.	Dispersión de velocidad de grupo (<i>group velocity dispersion</i> , GVD)	23
2.5.2.	Dispersión de orden superior	24
2.5.3.	Pérdidas	24
2.5.4.	Modulación autofásica (<i>self-phase modulation</i> , SPM)	24
2.4.5.	Pérdidas dependientes de la polarización	25
2.4.6.	Birrefringencia	25
2.6.	SSPROP	25
2.6.1.	La ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE)	26
2.6.2.	Split-Step Fourier Method (SSFM)	26
2.7.	SSPROPV	27
3.	EJECUCIÓN DEL PROYECTO	28
3.1.	Propagación de un pulso gaussiano por una SMF	28
3.2.	Propagación por una FMF de 2 modos	29
3.2.1.	Propagación por los modos LP11a y LP11b	31

3.2.2. Propagación por los modos LP01 y LP02.....	32
3.3. Propagación por una FMF de 3 modos	33
3.3.1. Propagación por el modo LP21	34
3.3.2. Propagación de un pulso por cada uno de los modos y análisis para diferentes valores de atenuación	35
3.3.3. Análisis de la potencia de salida para diferentes distancias de fibra.....	36
4. CONCLUSIONES	38
5. BIBLIOGRAFIA	39
6. ANEXO	41
6.1. MainSMF	41
6.2. Ssprop.....	42
6.3. MainFMF3	43
6.4. SspropFMF3.....	45
6.5. MainFMF3dist	51

Tabla de contenido

Figura 1. Cable de fibra óptica [1].	12
Figura 2. Reflexión [2].	13
Figura 3. Refracción [2].	13
Figura 4. Ecuación y representación de una onda electromagnética [3].	14
Figura 5. Curva de β frente a V para los modos que se propagan por la fibra [3].	15
Figura 6. Multiplexación [12].	16
Figura 7. Multiplexación WDM [8].	17
Figura 8. Multiplexación TDM [9].	17
Figura 9. Multiplexación CDM [12].	17
Figura 10. Multiplexación SDM [12].	18
Figura 11. Fibra multi elemento (MEF) [16].	19
Figura 12. Fibra de pocos modos (FMF) [16].	22
Figura 13. Espectro de transmisión de banda de paso [19].	22
Figura 14. Fibra de banda prohibida fotónica de núcleo hueco (HC-PBGF) [20].	23
Figura 15. Esquema del <i>Split Step Fourier Method</i> .	26
Figura 16. Pulso gaussiano a la entrada de la fibra.	29
Figura 17. Pulsos gaussianos en la salida de la fibra para diferentes distancias.	29
Figura 18. Se transmite pulso por LP11a H.	31
Figura 19. Se transmite pulso por LP11a H.	31
Figura 20. Se transmiten pulsos por LP11a H y LP11b H.	31
Figura 21. Se transmiten pulsos por LP11a H y LP11b H.	31
Figura 22. Se transmite pulso por LP01 H.	32
Figura 23. Se transmite pulso por LP01 H.	32
Figura 24. Se transmite pulso por LP02 H.	32
Figura 25. Se transmite pulso por LP02 H.	32
Figura 26. Se transmiten pulsos por LP01 H y LP02 H.	33
Figura 27. Se transmiten pulsos por LP01 H y LP02 H.	33
Figura 28. Se transmite pulso por LP21 H.	34
Figura 29. Se transmite pulso por LP21 H.	34
Figura 30. Se transmite con atenuación 0.2 dB/km.	35
Figura 31. Se transmite con atenuación 0.2 dB/km.	35
Figura 32. Se transmite con atenuación 0.8 dB/km.	35
Figura 33. Se transmite con atenuación 0.8 dB/km.	35
Figura 34. Se transmite con atenuación 1.4 dB/km.	36
Figura 35. Se transmite con atenuación 1.4 dB/km.	36
Figura 36. Potencia vs Distancia transmitiendo el mismo pulso.	36
Figura 37. Ampliación de la figura de la izquierda.	36
Figura 38. Potencia vs Tiempo en la entrada.	37
Figura 39. Potencia vs Frecuencia en la entrada.	37
Figura 40. Potencia vs Distancia transmitiendo diferentes pulsos.	37

Tabla 1. Correspondencia entre modos exactos y LP de menor frecuencia de corte [24].	15
Tabla 2. Los dos tipos de MCF [17].	20
Tabla 3. Características de la fibra extraídas del <i>datasheet</i> SMF-28e+ de Corning [22].	28
Tabla 4. Características de la fibra extraídas del <i>datasheet</i> 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company [23].	30
Tabla 5. Características de la fibra especificadas en el <i>datasheet</i> 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company [23].	34

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto del trabajo

La capacidad de los sistemas de comunicación de fibra óptica ha ido incrementando a lo largo de los años. La comunicación óptica coherente ha proporcionado las mejoras más recientes en lo referente a la capacidad, consiguiendo alcanzar un rendimiento cercano al límite teórico impuesto sobre las fibras estándar de modo único (SMFs) gracias a la fórmula de Shannon combinada con efectos no-lineales.

De modo que, para conseguir aumentar aún más la capacidad de las fibras ópticas, solo quedaba explotar otras dimensiones como, por ejemplo, el espacio, con tal de poder transmitir por múltiples caminos ópticos paralelos. Esto se consigue con la multiplexación por división en el espacio (*space-division multiplexing*, SDM).

Los sistemas de multiplexado por división espacial se pueden implementar utilizando múltiples SMFs, pero se observó que no proporcionaban una gran reducción del coste por bit, por tanto, hace aproximadamente una década el sector de la comunicación por fibra óptica empezó a investigar con el objetivo de identificar sistemas de fibra SDM de alta capacidad, escalables y rentables. Y dos tipos de fibra emergieron:

- Las fibras multinúcleo (*multi core fibers*, MFCs), donde múltiples núcleos de guía se introducen en una misma área de revestimiento.
- Las fibras multimodo (*multi mode fibers*, MMFs), donde dentro de un mismo núcleo las ondas de luz se dispersan en múltiples caminos paralelos llamados modos.

En este trabajo final se investiga el estado del arte de estos dos tipos de fibra óptica, a la vez que se mencionan otros de interés dentro del marco de la SDM, y se implementa una de ellas en Matlab.

Se parte de una rutina –denominada SSPROP– realizada por la Universidad de Maryland y, con los modelos matemáticos estudiados, se desarrolla el código para hacer simulaciones que nos permitan analizar el comportamiento de la propagación por la fibra óptica y extraer las conclusiones oportunas. La finalidad es ser testigos de los beneficios que aporta en la comunicación por fibra óptica utilizar la técnica de multiplexación por división en el espacio.

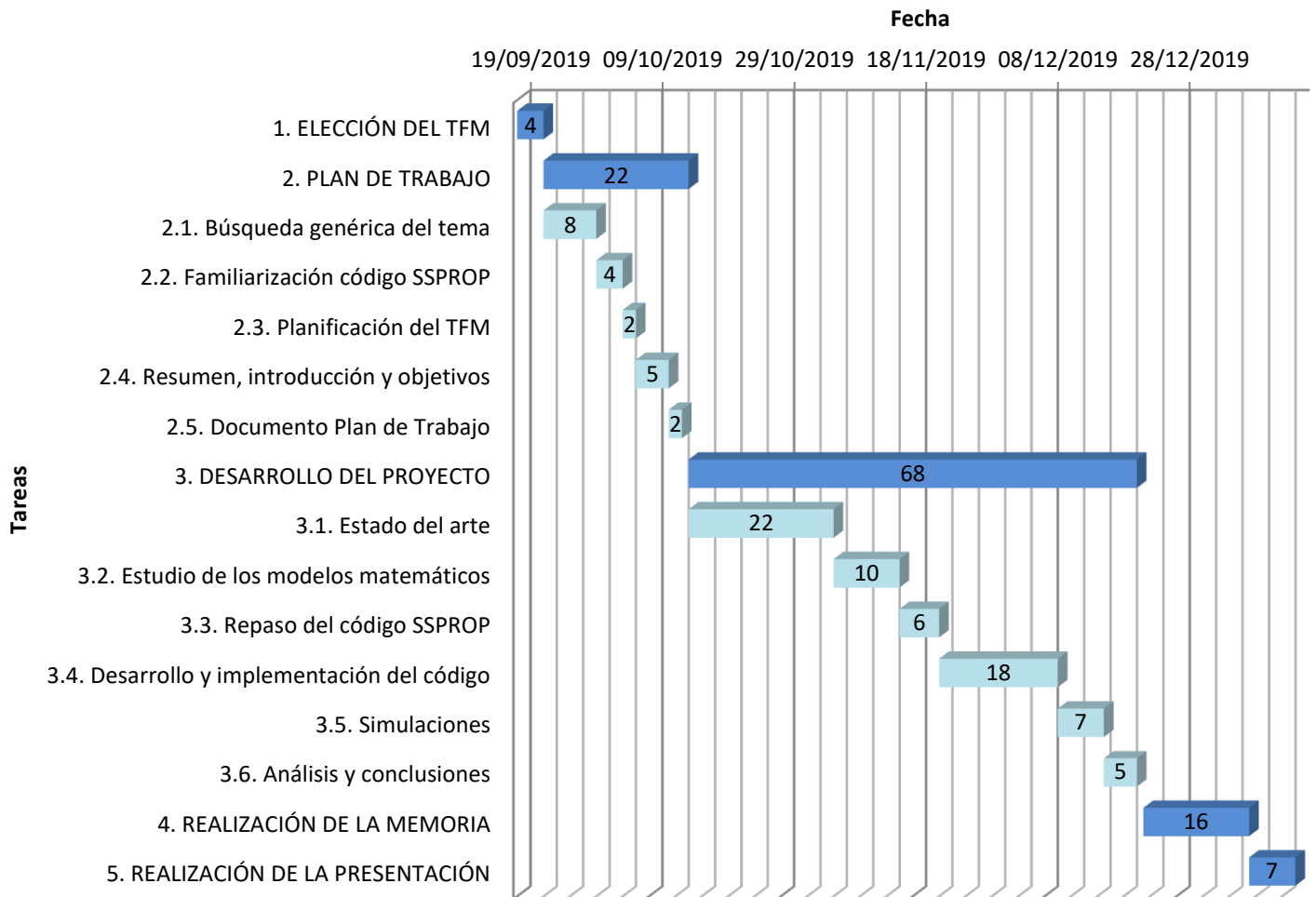
1.2. Objetivos

Los objetivos concretos del trabajo, se resumen en los siguientes puntos:

1. Investigar diferentes tipos de fibras que utilizan SDM.
2. Comprender el módulo con la rutina SSPROP de Matlab.
3. Diseño e implementación de uno de los tipos de fibra en Matlab.
4. Efectuar diferentes simulaciones para entender el comportamiento de la fibra.

5. Analizar los resultados.

1.3. Plan de trabajo



1) **Elección del TFM:** Dentro del área de las comunicaciones ópticas, se barajan los diferentes proyectos propuestos, se resuelven dudas con la tutora y se escoge el trabajo de mayor interés.

2) **Plan de trabajo:** Se establecen las bases que forman el proyecto. Constan de las siguientes tareas:

- 2.1) **Búsqueda genérica del tema:** Se hace una primera búsqueda de información general para dar una forma más concreta al proyecto.
- 2.2) **Familiarización del código SSPROP:** Para la implementación se parte de un módulo ya desarrollado, por tanto, se dedica un tiempo a familiarizarse con ese código.
- 2.3) **Planificación del TFM:** Ahora que hay una idea más clara, se establece un calendario para dividir las tareas teniendo en cuenta de cumplir el calendario propio de la UOC.

- 2.4) Resumen, introducción y objetivos: El nombre lo indica. Se establece un resumen inicial, una introducción que contextualice el TFM y se fijan los objetivos.
 - 2.5) Documento Plan de trabajo: Se revisa y modifica –si es necesario– lo mencionado hasta ahora, para presentar el documento final de la primera entrega de la asignatura.
- 3) **Desarrollo del proyecto**: Una vez se tiene claro el plan de trabajo, se desarrolla el proyecto. Contiene las siguientes tareas:
- 3.1) Estado del arte: Investigación teórica que explique los conceptos necesarios de fibra óptica, multiplexación SDM, fibras multinúcleo, fibras multimodo, modelos matemáticos...
 - 3.2) Estudio de modelos matemáticos: Se dedica un tiempo en concreto a entender correctamente las ecuaciones para poder realizar la posterior implementación práctica.
 - 3.3) Repaso del código SSPROP: Por si es necesario, se reservan unos días para repasar el código que vimos al inicio ahora que se conocen los modelos matemáticos para implementar las fibras multinúcleo/multimodo.
 - 3.4) Desarrollo e implementación del código: Con todo el conocimiento anterior, se escoge que tipo de fibra implementar (multinúcleo o multimodo) y se desarrolla el código en Matlab.
 - 3.5) Simulaciones: Se ejecutan las rutinas previamente desarrolladas.
 - 3.6) Análisis y conclusiones: Tras obtener las simulaciones pertinentes, se hace un análisis y se exponen las conclusiones a las que se llega.
- 4) **Realización de la memoria**: Todo lo descrito anteriormente, se revisa y se plasma en lo que será el documento final del proyecto.
- 5) **Realización de la presentación**: Se prepara un *Power Point* resumiendo los conocimientos más importantes, presentando las gráficas y datos más relevantes y exponiendo las conclusiones finales. Y se presenta el trabajo final de máster.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción a la fibra óptica

La fibra óptica es un medio físico de transmisión de información, que consiste en un filamento delgado de vidrio (sílice) o de plástico a través del cual viajan pulsos de luz láser o led, en los que se contienen los datos a transmitir.

Las diferentes partes que forman un cable de fibra óptica son las siguientes:

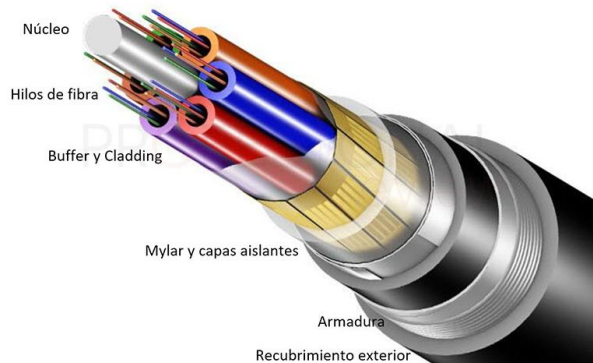


Figura 1. Cable de fibra óptica [1].

- **Núcleo:** Elemento central del cable de fibra óptica que proporciona un refuerzo para evitar la rotura y deformación del cable. No siempre está presente.
- **Drenaje de humedad:** Este elemento conduce posible humedad que tenga el cable para que salga a través de él. Va enrollado en el núcleo y no siempre está presente.
- **Hilos de fibra:** Elemento conductor por el que viaja la luz, y los datos en ella. Están hechos de cristal de silicio o plástico de extrema calidad que crean un medio en el que la luz pueda reflejarse y refractarse correctamente hasta llegar al destino.
- **Buffer y Cladding (revestimiento):** Recubre los hilos de fibra óptica y consiste en un relleno de gel de capa oscura para evitar que los rayos de luz salgan de la fibra. A su vez el buffer es el recubrimiento externo que contiene el gel y la fibra.
- **Cinta de Mylar y capas aislantes:** Es un recubrimiento aislante (por tanto, de material dieléctrico) que recubre todos los buffers de fibra.
- **Recubrimiento ignífugo:** Recubrimiento capaz de soportar las llamas en caso de que el cable sea resistente al fuego.
- **Armadura:** Es la armadura del cable, la cual está construida de hilos de Kevlar.
- **Recubrimiento exterior:** Recubrimiento exterior de plástico o PVC.

Como por el cable de fibra óptica viaja una señal luminosa, la transmisión se produce gracias a los fenómenos físicos de reflexión y refracción.

La reflexión de un haz de luz se produce cuando éste incide sobre una superficie de separación de dos medios y se produce el cambio de dirección de la onda que la lleva a tomar una dirección con un ángulo igual al de incidencia ($\hat{i} = \hat{r}$).

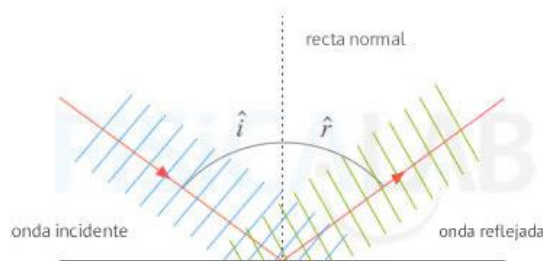


Figura 2. Reflexión [2].

La refracción es el cambio de dirección y velocidad que experimenta un haz de luz al pasar de un medio a otro con distinto índice refractivo.

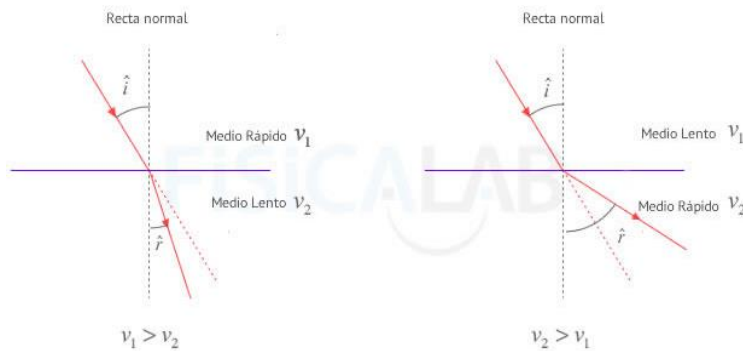


Figura 3. Refracción [2].

La ley de Snell marca la relación entre el ángulo de incidencia (\hat{i}), el de refracción (\hat{r}) y el de las velocidades (v_1 y v_2) de las ondas en los distintos medios, a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\sin(\hat{i})}{\sin(\hat{r})} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

2.2. Modos de propagación por la fibra óptica

Las ondas electromagnéticas viajan a través de la guía de ondas en diferentes modos de propagación. Un modo es la manera en la que la energía se puede propagar a lo largo de una guía y para que todos estos modos existan se deben satisfacer ciertas condiciones de frontera.

Los modos de propagación dependen de la longitud de onda, de su polarización y de las dimensiones de la guía. Como cada modo tiene una frecuencia de corte asociada, la frecuencia de la señal a transmitir deberá ser mayor que la frecuencia de corte, de esta manera la energía electromagnética se transmitirá a través de la guía sin atenuación.

Los modos se clasifican en:

- Modo TE (Transversal eléctrico): la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula.
- Modo TM (Transversal magnético): la componente del campo magnético en la dirección de propagación es nula.
- Modo TEM (Transversal electromagnético): la componente tanto del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación es nula.
- Modo HE o EH (Híbrido): sí tienen componente en la dirección de propagación tanto en el campo eléctrico como en el magnético.

La resolución de las ecuaciones de Maxwell para una guía de onda cilíndrica con condiciones de frontera establecidas por la geometría de la fibra, nos presenta la siguiente ecuación electromagnética:

$$\nabla^2 E = n^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$E = E(r) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

Campo transversal estacionario Propagación

Campo eléctrico Campo magnético Dirección de avance de la onda electromagnética

Figura 4. Ecuación y representación de una onda electromagnética [3].

La resolución de esta ecuación lleva a dos parámetros de interés: la frecuencia normalizada y la constante de propagación normalizada.

Por un lado, la frecuencia normalizada o número V , que establece el valor de frecuencia (λ) que se debe alcanzar para que un cierto modo se propague. Se calcula con la expresión:

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

Donde a es el radio del núcleo, y n_1 y n_2 los índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra. Si $V < 2.405$ se trata de una fibra monomodo y si $V > 2.405$ de una fibra multimodo.

Por otro lado, a la constante de propagación normalizada, b , la cual es característica para cada modo. Se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$b = \frac{(\beta/k_0) - n_2}{n_1 - n_2} \quad (3)$$

Donde $\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$ y k la constante de propagación. En estas ecuaciones los índices de refracción cumplen la condición $n_1 - n_2 \ll 1$.

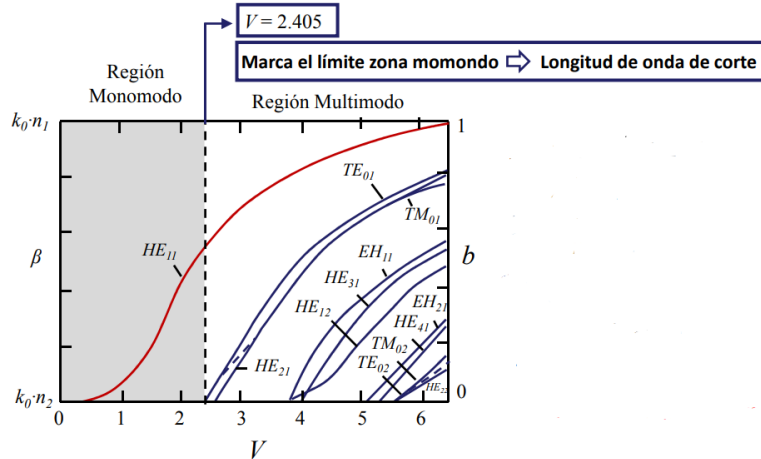


Figura 5. Curva de b frente a V para los modos que se propagan por la fibra [3].

Cuando se cumple la condición $n_1 - n_2 \ll 1$, se está haciendo una aproximación para simplificar el tratamiento de las ecuaciones de Maxwell, cuya resolución exacta es matemáticamente complicada y conduce a resultados complejos.

Esta aproximación se denomina de modos débilmente guiados o *weakly-guided modes* (WGM).

La primera consecuencia de la adopción del modelo WGM es la aparición de los denominados modos linealmente polarizados o modos LP, los cuales no son soluciones directas de las ecuaciones de Maxwell (a excepción del modo fundamental), sino combinaciones lineales de varias soluciones.

La adopción de modos LP permite evitar el uso de los modos EH, HE, TE y TM anteriores dentro de la aproximación WGM. En la siguiente tabla se muestran las correspondencias entre modos exactos y modos LP:

Modos LP (ordenados por frecuencia de corte)	Modos exactos y número	Nº de modos total en el modo LP
LP ₀₁	HE ₁₁ × 2	2
LP ₁₁	TE ₀₁ , TM ₀₁ , HE ₂₁ × 2	4
LP ₂₁	EH ₁₁ × 2, HE ₃₁ × 2	4
LP ₀₂	HE ₁₂ × 2	2
LP ₃₁	EH ₂₁ × 2, HE ₄₁ × 2	4
LP ₁₂	TE ₀₂ , TM ₀₂ , HE ₂₂ × 2	4
LP ₄₁	EH ₃₁ × 2, HE ₅₁ × 2	4
LP ₂₂	EH ₁₂ × 2, HE ₃₂ × 2	4
LP ₀₃	HE ₁₃ × 2	2
LP ₅₁	EH ₄₁ × 2, HE ₆₁ × 2	4
LP _{1m}	TE _{0m} , TM _{0m} , HE _{2m} × 2	4
LP _{1m} (≠ 0 ó 1)	EH _{l-1,m} × 2, HE _{l+1,m} × 2	4

Tabla 1. Correspondencia entre modos exactos y LP de menor frecuencia de corte [24].

2.3. Tipos de multiplexación

La multiplexación es la técnica de combinar dos o más señales, y transmitir las por un solo medio de transmisión. Se comparte la capacidad de transmisión de datos sobre un mismo enlace, de manera que se aumenta la eficiencia. El dispositivo encargado de recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido es el multiplexor, mientras que el demultiplexor es el dispositivo que hace el proceso inverso.



Figura 6. Multiplexación [12].

En la comunicación por fibra óptica, la multiplexación se considera el principal medio para la expansión de la ingeniería de redes de fibra existente. Dado que los datos ópticos pueden transportarse empleando diferentes dimensiones físicas, como el tiempo, la frecuencia, el espacio, la polaridad, etc., se pueden utilizar diferentes técnicas de multiplexación para aumentar la capacidad de transporte de datos de una sola fibra óptica.

A continuación, se revisan los tipos de multiplexación más utilizadas.

2.3.1. Multiplexación por división en frecuencia (FDM) y longitud de onda (WDM)

La multiplexación FDM se basa en dividir el ancho de banda total disponible en una serie de sub-bandas de frecuencia. Este proceso es posible cuando la anchura de banda del medio de transmisión excede de la anchura de banda de las señales a transmitir.

Se pueden transmitir varias señales simultáneamente si cada una se modula con una portadora de frecuencia distinta, y las frecuencias de las portadoras están lo suficientemente separadas como para que no se produzcan interferencias. Para ello, las sub-bandas se separan por unas bandas de guarda para evitar el solapamiento.

Mientras que la multiplexación FDM es generalmente empleada para referirse a una portadora de radiofrecuencia, la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) se refiere a una portadora óptica. Por tanto, esta tecnología es la que permite transmitir varias señales independientes sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un LED.

Hay dos tipos de WDM:

- DWDM (*Dense WDM*): Muchas longitudes de onda y larga distancia.
- CWDM (*Coarse WDM*): Pocas longitudes de onda y entornos metropolitanos.

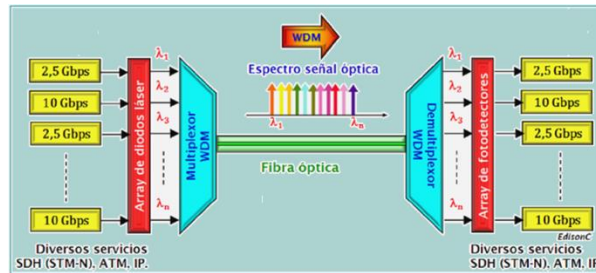


Figura 7. Multiplexación WDM [8].

2.3.2. Multiplexación por división en tiempo (TDM)

Es una técnica que permite la transmisión de señales digitales ocupando un canal de transmisión a partir de distintas fuentes. El ancho de banda total del medio de transmisión es asignado a cada canal durante una fracción del tiempo total (intervalo de tiempo).

El multiplexor por división en el tiempo muestrea cíclicamente las señales de entrada de los diferentes usuarios, y transmite las tramas a través de una única línea de comunicación de alta velocidad. La operación de muestreo debe ser lo suficientemente rápida para que cada buffer sea vaciado antes de que lleguen nuevos datos.

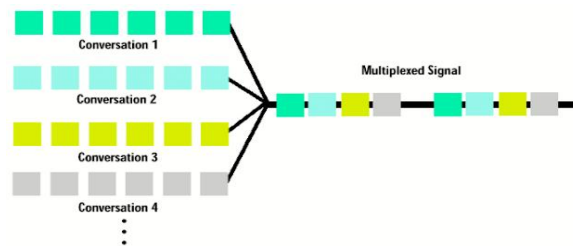


Figura 8. Multiplexación TDM [9].

2.3.3. Multiplexación por división de código (CDM)

Es una técnica donde cada canal transmite sus bits como una secuencia de pulsos codificada de forma única para ese canal. Se consigue transmitiendo una serie de pulsos cortos. Esto permite transmitir por una misma fibra varios canales con códigos diferentes.

Este tipo de multiplexación es compleja y es más conocida su variante de acceso múltiple (*Code Division Multiple Access, CDMA*).

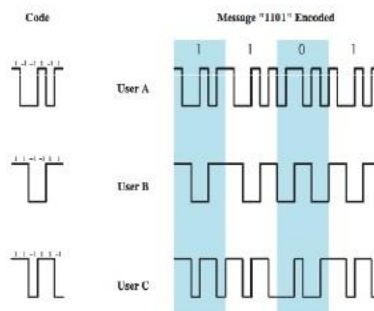


Figura 9. Multiplexación CDM [12].

2.3.4. Multiplexación por división en el espacio (SDM)

Se han utilizado técnicas de multiplexación con dimensiones como el tiempo y la frecuencia/longitud de onda, de modo que, tal y como se comentó en la *Introducción* de este proyecto, faltaba por explorar la dimensión del espacio para aumentar la capacidad de datos transmitidos y poder hacer frente a nuevas tecnologías emergentes.

El término SDM se emplea para referirse a técnicas de multiplexación que establecen múltiples rutas paralelas de datos dentro de una misma fibra. Dada la proximidad de las rutas, el principal desafío técnico es la diafonía (*cross-talk*), la cual se define como una perturbación causada por los campos eléctricos o magnéticos de una señal que afectan a una señal en un circuito (o camino) adyacente.

En la transmisión de fibra óptica, se han propuesto dos tipos esquemas SDM:

- Las fibras multinúcleo (*multi core fibers*, MFCs), donde múltiples núcleos de guía se introducen en una misma área de revestimiento.
- Las fibras multimodo (*multi mode fibers*, MMFs), donde dentro de un mismo núcleo las ondas de luz se dispersan en múltiples caminos paralelos llamados modos.

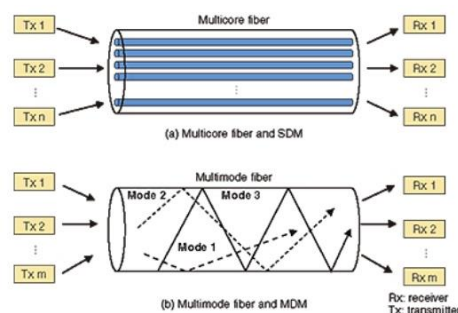


Figura 10. Multiplexación SDM [12].

A continuación, se presentan los diferentes tipos de fibra óptica existentes, con un enfoque más detallado en las dos fibras que se acaban de mencionar: MCF y MMF.

2.4. Tipos de fibra óptica

La principal clasificación surge al distinguir entre las fibras monomodo (SMF) y las fibras multimodo (MMF).

La SMF solo permite que el modo fundamental de luz transmita por la fibra mientras que la MMF permite que múltiples rutas de luz viajen por la fibra a la vez. Las principales diferencias entre la SMF y la MMF se muestran en el diámetro del núcleo de la fibra, la longitud de onda, la fuente de luz y el ancho de banda:

El tamaño del núcleo de la **fibra monomodo** es más pequeño (aproximadamente $9\ \mu m$) y transporta la luz directamente por la fibra. Como resultado, la reflexión de la luz creada durante la transmisión de la luz disminuye, disminuyendo la atenuación y

permitiendo que la señal viaje con éxito a distancias más largas. A menudo, utiliza un láser o diodos láser para producir luz inyectada en el cable. Las longitudes de onda de fibra monomodo comúnmente utilizadas son 1310 nm y 1550 nm.

Por otro lado, el tamaño del núcleo de la **fibra multimodo** es de cinco a seis veces mayor en diámetro (de 50 μm a 62,5 μm) que en las SMF, lo que permite una capacidad de captación de luz mucho mayor y facilita el uso de dispositivos electroópticos más baratos. Pero al viajar por la fibra múltiples modos a la vez, está más limitado en la distancia de transmisión y el ancho de banda. Debido al gran tamaño del núcleo de la fibra multimodo, algunas fuentes como el LED y VCSEL (láseres emisores de superficie de cavidad vertical) funcionan en la longitud de onda de 850 nm y 1310 nm.

Una vez hecha la distinción entre fibras monomodo y multimodo, se presentan diferentes tipos de fibra óptica que implementan la multiplexación SDM.

2.4.1. Fibra multi elemento (*multi element fiber, MEF*)

Consiste en un paquete de elementos de fibra monomodo unidos en un recubrimiento de polímero común, cada elemento de fibra tiene un núcleo y revestimiento independientes.

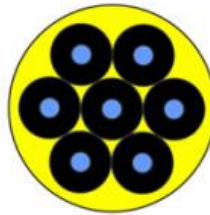


Figura 11. Fibra multi elemento (MEF) [16].

Esta geometría permite que cada uno de los elementos de fibra sea más pequeño en diámetro que un SSMF ya que tener los elementos de fibra dibujados dentro de un recubrimiento común tiene el potencial de reducir las pérdidas por micro flexión en relación con fibras individuales del mismo tamaño. También, la geometría MEF proporciona un fácil acceso a los elementos de fibra individuales simplemente quitando el recubrimiento común. De esta manera, cada elemento de fibra se puede empalmar individualmente a los componentes SSMF.

La distancia entre los elementos de fibra MEF debe controlarse cuidadosamente durante el proceso de fabricación para lograr el grado requerido de robustez y evitar la introducción de pérdidas adicionales. El espacio para una fibra de transmisión debe ser tal que los elementos de fibra estén muy cerca, pero no físicamente en contacto entre sí, lo que da como resultado una implementación compacta sin degradación del rendimiento. Se ha observado que las características de atenuación y dispersión de MEF son similares a las de SSMF. Los MEF fabricados hasta ahora exhiben niveles de *cross-talk* por debajo de 100 dB entre los diversos elementos de fibra.

2.4.2. Fibra multi núcleo (*multi core fiber, MCF*)

Consiste en incorporar múltiples núcleos dentro de una misma fibra. Estos núcleos deben de estar separados de sus núcleos vecinos lo suficiente para producir un nivel de *cross-talk* bajo.

Comentar que el enfoque MCF ofrece también que haya múltiples caminos además de múltiples núcleos, su mayor obstáculo es la supresión de *cross-talk* si el número de núcleos es muy elevado dentro de un mismo revestimiento.

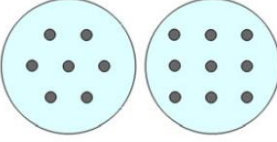
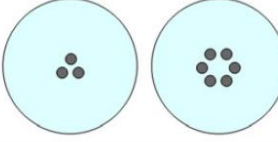
	Weakly-coupled MCF	Strongly-coupled MCF
Examples of schematic cross-sectional view		
Coupling coefficient κ [m^{-1}]	$\kappa < 0.01$	$\kappa > 0.1$
Typical core-to-core distance Λ [μm]	$\Lambda > 30$	$\Lambda < 30$
MIMO for inter-core crosstalk	No need	Need

Tabla 2. Los dos tipos de MCF [17].

Tal cual muestra la Tabla 2, las MCF se pueden clasificar en dos tipos:

- **MCF débilmente acoplada:** cada núcleo se usa como una guía de onda individual con una interferencia suficientemente baja entre los núcleos vecinos.

El *cross-talk* óptico entre núcleos adyacentes es un problema importante, ya que una parte de la potencia óptica lanzada en uno de los núcleos se acopla con los núcleos vecinos durante la propagación. El *cross-talk* (XT) se define como:

$$XT = 10 \log_{10}(P'/P) \quad [dB] \quad (4)$$

Donde P y P' son la potencia de salida del núcleo de entrada y la del núcleo vecino, respectivamente.

Para mantener el nivel de XT inferior a -30 dB, el coeficiente de acoplamiento κ entre núcleos adyacentes debe ser inferior a $10^{-2}m^{-1}$ para una distancia de transmisión de más de 10 km, sacrificando la densidad del núcleo, y la típica distancia entre núcleos es de alrededor de 40 μm . En este caso, el procesamiento de señal digital (DSP) de entrada múltiple y salida múltiple (MIMO) no es necesario en el lado del receptor para recuperar las señales.

- **MCF fuertemente acoplada:** el *cross-talk* entre núcleos se introduce intencionalmente al disminuir la distancia entre núcleos, lo que resulta en la mejora de la densidad del núcleo. En teoría, una MCF fuertemente acoplada admite varios modos y se puede considerar una forma de MMF. En la práctica, estos súper modos están fuertemente mezclados debido a las fluctuaciones de los parámetros estructurales y/o al efecto de flexión si la diferencia de índice efectiva Δ_{neff} entre cada modo es relativamente pequeña (típicamente $\Delta_{neff} < 10^{-5}$).

En la transmisión MMF, la dispersión de retardo grupal que se origina en la dispersión modal, es uno de los principales problemas ya que la magnitud de la propagación de retardo grupal determina la complejidad del receptor MIMO y, por lo tanto, el alcance del sistema.

La mezcla de modo fuerte en una MCF fuertemente acoplada es beneficiosa para reducir la propagación de retardo de grupo, y la propagación de retardo de grupo es proporcional a la raíz cuadrada de la distancia de transmisión. El coeficiente de acoplamiento κ entre núcleos vecinos en las MCF fuertemente acopladas es del orden de 10^{-1} m^{-1} y la distancia típica entre núcleos es inferior a $30 \mu\text{m}$. En este caso, se necesita el procesamiento de señal digital (DSP) de entrada múltiple y salida múltiple (MIMO) con baja complejidad en el lado del receptor para deshacer las señales.

2.4.3. Fibra de pocos modos (*few modes fiber, FMF*)

Como se ha comentado previamente, las fibras de múltiples modos tienen problemas en alcanzar grandes distancias. Esto es debido a que sufren problemas de distorsión, como la dispersión modal, por tanto, aunque pueden admitir entre 100 y 200 modos –y podrían usarse para transmitir más datos– la transmisión a largas distancias se vuelve problemática.

Las fibras monomodo, por otro lado, proporcionan ventajas sobre las fibras multimodo en escenarios de comunicación a larga distancia pero sufren problemas de no linealidad, como la modulación de fase propia (SPM), la modulación de fase cruzada (XPM) y la mezcla de cuatro ondas (FWM), los cuales limitan la capacidad de transmisión de la fibra.

Se pueden obtener ventajas cuando las fibras ópticas utilizan más de un modo espacial pero sin alcanzar tantos como en las fibras multimodo. Es ahí donde entran las llamadas fibras de pocos modos (FMF), las cuales pueden soportar aproximadamente de 2 a 50 modos. Las FMF no tienen los mismos problemas con la no linealidad que las fibras de modo único y se pueden configurar para no tener los problemas de dispersión modal que son comunes a la fibra multimodo.

Pero aunque las fibras multimodo resuelven los problemas de no linealidad asociados con las fibras monomodo, el problema del acoplamiento de modo sigue siendo un impedimento en el escenario de comunicaciones de larga distancia.

Una forma de reducir el acoplamiento de modo es asegurar que los modos soportados del medio de la fibra tengan constantes de propagación tan diferentes como sea posible porque a medida que aumenta la diferencia entre las constantes de propagación de dos modos, el acoplamiento entre estos modos decrece drásticamente. Conseguir aumentar la diferencia de índice entre los diferentes modos es posible reduciendo el número de modos que admite la fibra, es decir, utilizando la fibra de pocos modos. Es por ello que algunas de las FMF más implementadas solo admiten de 2 a 10 modos espaciales, de 2 a 5 modos o incluso solo 2, 3 o 4 modos.

El número de modos que admite una fibra de modo reducido puede, en algunos casos, depender de la tecnología de compensación de dispersión óptica y/o electrónica utilizada en el sistema de transmisión en el que se utiliza la fibra.

El núcleo de la fibra de pocos modos tiene un diámetro de entre 10 y $60 \mu\text{m}$ y el revestimiento tiene un diámetro exterior de 80 a $300 \mu\text{m}$.



Figura 12. Fibra de pocos modos (FMF) [16].

2.4.4. Fibra de cristal de banda prohibida fotónica de núcleo hueco (*hollow core photonic bandgap crystal fibers, HC-PBCF*)

Las fibras de banda prohibida fotónicas de núcleo hueco utilizan una estructura altamente periódica de agujeros de aire en el revestimiento de la fibra para crear una banda prohibida fotónica. Esto significa que la luz de las frecuencias dentro de esa banda no puede propagarse a través del revestimiento y queda atrapada en el núcleo hueco de la fibra. En este tipo de fibras, no hay ningún requisito para que el índice de refracción del núcleo sea mayor que el índice del revestimiento.

Una característica inherente de las fibras de banda prohibida fotónica es que la fibra solo guía la luz en una región espectral limitada. Para fibras que guían alrededor de los 1550 nm, el ancho de banda típico es de aproximadamente 200 nm, y fuera de esta región, el núcleo de fibra es anti-guía.

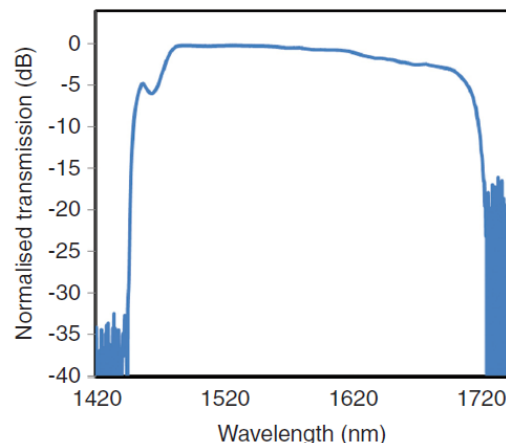


Figura 13. Espectro de transmisión de banda de paso [19].

A continuación se destacan algunas de las características que ofrecen:

- Más del 98% de la potencia óptica se encuentra en el núcleo hueco. Como un porcentaje tan alto del modo está confinado en el aire y la interacción entre el modo fundamental y la sílice circundante es débil, estas fibras son muy insensibles a la radiación, lo que las hace adecuadas para entornos de radiación dura.
- Las fibras de núcleo hueco tienen gran variedad de aplicaciones: suministro de ancho de línea estrecho, suministro de energía, conformación y compresión de pulso, óptica no lineal, espectroscopia de gases, giroscopios de fibra óptica y sensores.
- El núcleo hueco permite el control de la composición y la presión del gas.

- Dado que solo una pequeña fracción de la luz se propaga en la sílice, el efecto de las no linealidades del material se reduce significativamente en comparación con las fibras de núcleo sólido.
- Ofrecen propiedades ópticas como: excelentes capacidades de manejo de potencia, baja latencia, la posibilidad de obtener ultra bajas pérdidas.
- Estas fibras son prácticamente insensibles a la flexión. Pueden doblarse hasta un diámetro de curvatura <1 cm sin ningún cambio en la transmisión óptica.

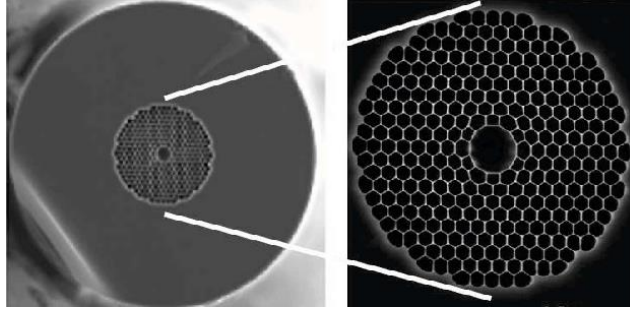


Figura 14. Fibra de banda prohibida fotónica de núcleo hueco (HC-PBGF) [20].

2.5. Dispersión y efectos no lineales de la fibra óptica

2.5.1. Dispersión de velocidad de grupo (*group velocity dispersion, GVD*)

La dispersión es un fenómeno por el cual un pulso se deforma a medida que se propaga a través de la fibra óptica. Hay diferentes tipos de dispersión: la dispersión modal, la dispersión por polarización de modo y la dispersión cromática. Debido a esta última, las diferentes componentes espectrales de una señal viajan a velocidades diferentes en la fibra.

La dispersión de velocidad de grupo (GVD) es una característica de un medio dispersivo que se usa para determinar cómo afectará el medio a la duración de un pulso óptico que lo atraviesa. Se define como:

$$GVD = \frac{\partial}{\partial \omega} \frac{1}{v_g} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \quad (5)$$

Donde v_g es la velocidad de grupo, ω la frecuencia angular y β la constante de fase.

En el caso de las fibras ópticas, la dispersión por velocidad de grupo se expresa comúnmente en términos del parámetro de dispersión cromática, D , en $\frac{ps}{nm \cdot km}$, y suele definirse como una derivada con respecto a la longitud de onda (en lugar de la frecuencia angular). Se puede calcular a partir del parámetro GVD:

$$D_\lambda = \frac{\partial}{\partial \lambda} \frac{1}{v_g} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot GVD = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2 \quad (6)$$

De donde podemos extraer el parámetro β_2 :

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (7)$$

2.5.2. Dispersión de orden superior

La dispersión de tercer orden (y órdenes superiores) se llama dispersión de orden superior. Cuando se trata de espectros ópticos muy amplios, a veces hay que considerar la dispersión hasta el cuarto o incluso quinto y sexto orden.

El parámetro β_3 se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\beta_3 = \left(\frac{\lambda^2}{2\pi c}\right)^2 (2\lambda_0 D + \lambda_0^2 D') \quad (8)$$

Siendo la pendiente (*slope*) $S = D' = \frac{\partial D}{\partial \lambda}$ en $\frac{ps}{nm^2 \cdot km}$. También se puede expresar β_3 en función de β_2 , quedando:

$$\beta_3 = \left(\frac{\lambda^2}{2\pi c}\right)^2 \cdot S - \frac{\lambda^2}{\pi c} \cdot \beta_2 \quad (9)$$

2.5.3. Pérdidas

La atenuación de una fibra óptica mide la cantidad de luz perdida entre la entrada y la salida. La atenuación total es la suma de todas las pérdidas. Las pérdidas ópticas de una fibra se miden normalmente en dB/km y se denomina coeficiente de atenuación de la fibra, α . Su expresión es:

$$\alpha = -\frac{10}{z[km]} \log\left(\frac{P(z)}{P(0)}\right) \quad (10)$$

Donde $P(z)$ es la potencia óptica en una posición z , y $P(0)$ es la potencia en el origen. Para pasar de lineal a dB , se utiliza:

$$\alpha_{km^{-1}} = \alpha_{dB} \cdot \frac{\ln(10)}{10} \quad (11)$$

2.5.4. Modulación autofásica (*self-phase modulation, SPM*)

Es un efecto óptico no lineal que surge de la interacción de la materia y la luz. Cuando un pulso ultracorto de luz viaja en un medio, induce un índice de refracción variable del medio debido al efecto óptico de Kerr. Esta variación en el índice de refracción producirá un cambio de fase en el pulso, lo que lleva a un cambio en el espectro de frecuencia del pulso.

El coeficiente no-lineal, γ , que aparece en la fibra se puede obtener con la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (12)$$

Siendo n_2 el índice de no-linealidad en $\frac{m^2}{W}$ y el área efectiva, $A_{eff} = \pi \left(\frac{MDF}{2}\right)^2$ en m^2 donde MDF es el *mode field diameter* en μm .

2.4.5. Pérdidas dependientes de la polarización

Se ha dicho previamente que a medida que la luz viaja por la fibra, pierde potencia. Uno de los motivos de la pérdida de energía es la polarización.

Los materiales ópticamente transparentes presentan una distribución de polarización espacial y cuando una señal óptica lo atraviesa, sufre una pérdida de potencia óptica en direcciones selectivas debido a la interacción de polarización espacial. Esta pérdida depende de la longitud de onda y se conoce como pérdida dependiente de polarización (PDL).

Se mide en dB y afecta la calidad de la señal y el rendimiento del sistema. A bajas tasas de datos, PDL es un contribuyente menor a las pérdidas. Sin embargo, cuando alcanza o supera el valor de 10 Gbit/s , PDL se vuelve comparable a las pérdidas de inserción (IL).

2.4.6. Birrefringencia

Se define como la propiedad óptica de un material que tiene un índice de refracción que depende de la polarización y la dirección de propagación de la luz. A menudo se cuantifica como la diferencia máxima entre los índices de refracción exhibidos por el material.

En fibra óptica, cuando dos modos presentan diferentes índices de refracción, la fibra presenta el efecto de birrefringencia. Esto lleva a dos velocidades de grupo diferentes para cada modo, lo cual indica que la birrefringencia conducirá a un fenómeno dispersivo.

La birrefringencia, como parámetro, se define como el valor absoluto local de la diferencia entre las constantes de propagación de ambos modos:

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| = \frac{2\pi}{\lambda} |n_x - n_y| = \frac{\omega}{c} \Delta n \quad (13)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y Δn es la diferencia del índice de refracción, también llamado grado de birrefringencia. En fibras estándar, el grado de birrefringencia es de aproximadamente 10^{-7} .

Si suponemos que la fibra se caracteriza por una birrefringencia uniforme a lo largo de su longitud L ($\Delta\beta$ es constante), el retardo de fase absoluto entre los dos modos de polarización puede describirse como:

$$\Delta\phi = |\beta_x - \beta_y|L = \Delta\beta L \quad (14)$$

2.6. SSPROP

La SSPROP es una rutina desarrollada en la Universidad de Maryland que resuelve la ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) implementando el Split-Step Fourier Method (SSFM). Esta función tiene en cuenta dispersiones y efectos no lineales descritos previamente: GVD, dispersión de orden superior, pérdidas y modulación autofásica.

2.6.1. La ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE)

La ecuación no lineal de Schrödinger se produce en el sistema Manakov –un modelo de propagación de ondas en fibra óptica–, y describe la propagación de la onda a través de un medio no lineal. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\frac{\partial A(t,z)}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(t,z)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(t,z)}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2} A(t,z) + i\gamma \left[|A(t,z)|^2 A(t,z) + \frac{i}{w_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R \frac{\partial(|A|^2)}{\partial t} A \right] \quad (15)$$

Donde α es la atenuación de la fibra; $B(w)$ la constante de propagación; $w_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$, siendo f_0 y λ_0 la frecuencia y longitud de onda centrales de $A(t,z)$; c la velocidad de la luz, γ el coeficiente de no linealidad; w_0 representa una aproximación del efecto Self-steepening; y T_R representa una aproximación del efecto Raman.

2.6.2. Split-Step Fourier Method (SSFM)

El SSFM es la técnica escogida para resolver la NLSE debido a su fácil implementación y velocidad en comparación con otros métodos. El uso del algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) hace que presente un menor tiempo computacional.

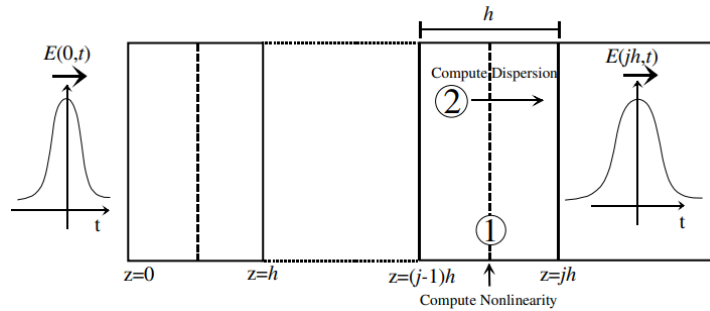


Figura 15. Esquema del Split Step Fourier Method.

Como se muestra en la imagen superior, la idea básica del método consiste en dividir la fibra en pequeños trozos (o *steps*) de longitud h , y se asume que la dispersión y la no linealidad de la fibra actúan de forma independiente.

Para entender su funcionamiento, se escribe la ecuación de propagación como:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\widehat{D} + \widehat{N})A \quad (16)$$

Donde \widehat{D} es un operador que representa los efectos lineales de la fibra (como la dispersión, la absorción del medio lineal), y \widehat{N} es el operador asociado a los efectos no lineales.

Por tanto, el pulso óptico se propaga a lo largo de la fibra y en cada trozo realizan estos tres pasos:

1. En la primera región del pequeño trozo, h , solo aparece el efecto de dispersión y se considera $\widehat{N} = 0$.

2. En el centro del trozo, solo aparece el efecto óptico no lineal y $\hat{D} = 0$, y se opera el efecto óptico no lineal correspondiente a todo el intervalo, h .
3. Se considera que solo el efecto de dispersión funciona en el intervalo restante de $\frac{h}{2}$.

Finalmente, se repite el proceso en cada trozo hasta alcanzar la longitud total de la fibra, L .

2.7. SSPROPV

La versión vectorial de SSPROP resuelve las ecuaciones de Schrödinger no lineales acopladas para propagación en una fibra birrefringente. El código puede modelar birrefringencia, retardo de grupo diferencial (PMD), dispersión dependiente de polarización y pérdida dependiente de polarización, todo en el contexto de propagación no lineal.

Los ejes birrefringentes de una fibra óptica pueden no estar orientados en las direcciones x e y , sino en alguna otra dirección arbitraria ψ . Además, los dos estados propios ortogonales de la fibra pueden no estar polarizados linealmente, pueden estar polarizados circularmente o elípticamente.

SSPROP permite especificar por separado no solo la dispersión $\beta(\omega)$ y las pérdidas (α) para cada uno de los dos estados propios, sino también los estados de polarización exactos a los que se aplican estos coeficientes.

3. EJECUCIÓN DEL PROYECTO

3.1. Propagación de un pulso gaussiano por una SMF

Para un primer contacto con el código, se propone generar un pulso gaussiano y propagarlo por una fibra monomodo dando diferentes valores de distancia para ver cómo afecta en la señal a la salida.

Para ello, se genera un pulso gaussiano a través de la siguiente expresión:

$$A_0 e^{\left(-\frac{t^2}{2t_0^2}(1+j*Chrip) \right)} \quad (17)$$

Donde A_0 es la amplitud del pulso en *watts*, t el tiempo de bit en *segundos*, t_0 el ancho del pulso en *segundos*, y *chirp* el factor que determina el grado de variación de la frecuencia (sin unidades).

La fibra monomodo se modela con los siguientes datos:

	SMF
Longitud de onda	1550 nm
Dispersión	18 ps/(nm·km)
Slope	0.092 ps/(nm ² ·km)
Atenuación	0.2 dB/km
Mode Field Diameter	10.4 μm

Tabla 3. Características de la fibra extraídas del *datasheet* SMF-28e+ de Corning [22].

Con todos estos datos y teniendo en cuenta las dispersiones y efectos no-lineales descritos entre los apartados 2.5.1 y 2.5.4 de este proyecto, se obtienen las entradas necesarias para poder ejecutar la función SSPROP:

u0: pulso gaussiano
dt: time step
dz: stepsize
nz: número de puntos
alpha: coeficiente de atenuación
betap: vector de coeficientes de dispersión
gamma: coeficiente de no-linealidad
maxiter: número máximo de iteraciones
tol: tolerancia de convergencia

El código desarrollado se encuentra en el Anexo 6.1. y 6.2.: **MainSMF** y **Ssprop**.

A continuación, se muestra el pulso a la entrada de la fibra y se presentan los resultados de la salida del pulso gaussiano para diferentes valores de distancia.

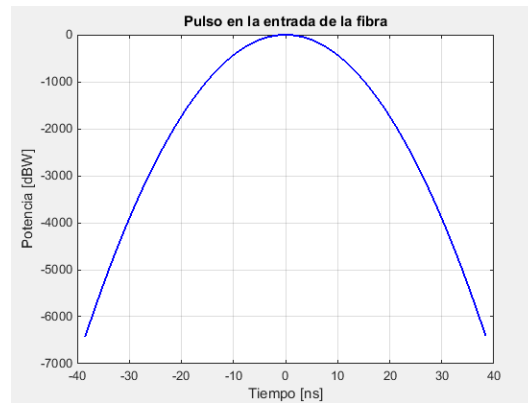


Figura 16. Pulso gaussiano a la entrada de la fibra.

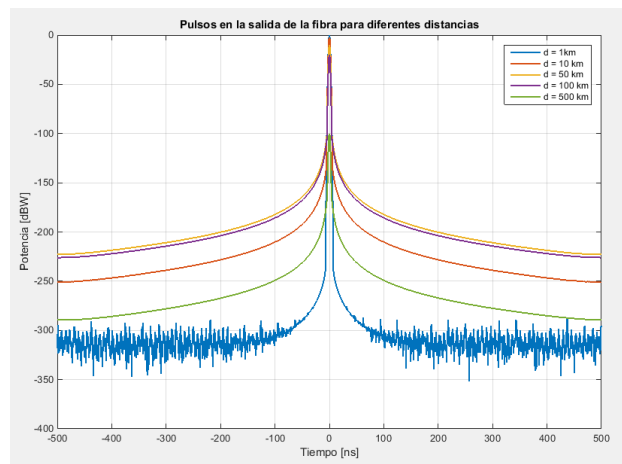


Figura 17. Pulsos gaussianos en la salida de la fibra para diferentes distancias.

La Figura 17 muestra los pulsos gaussianos en la salida de la fibra óptica para diferentes valores de distancias. Como se puede observar, a medida que aumenta la distancia, la potencia disminuye. Esto es debido a la atenuación de la fibra que –como se ha explicado previamente– es la suma de todas las pérdidas ópticas y está directamente relacionada con la distancia (ecuación 10).

Mencionar que la transmisión se realiza en tercera ventana (1550 nm) y ésta es la que tiene un valor de atenuación menor de $0,2\text{ dB/km}$ (en vez del $0,4\text{ dB/km}$ de la segunda ventana y del $2,5\text{ dB/km}$ de la primera ventana).

Observando la figura, también podemos observar como el pulso transmitido no mantiene su forma original (Figura 16), sino que sufre un ensanchamiento. Este efecto se produce gracias a la dispersión, que es proporcional a la longitud del enlace de fibra. Por tanto, con una distancia mayor, hay una mayor dispersión en los pulsos gaussianos.

3.2. Propagación por una FMF de 2 modos

Como objetivo de este proyecto, se propuso implementar, desarrollar y analizar una de las técnicas de multiplexación por división en el espacio. Se ha escogido las fibras de pocos modos (FMF).

Partiendo de la función SSPROV de la Universidad de Maryland descrita anteriormente, se modifica el código para analizar dos modos con sus respectivas polarizaciones horizontales y verticales. Las inputs son las siguientes:

u0xH: modo 1, polarización horizontal (H)
u0xV: modo 1, polarización vertical (V)
u0yH: modo 2, polarización horizontal (H)
u0yV: modo 2, polarización vertical (V)
dt: time step
dz: stepsize
nz: número de puntos
alphak1: coeficiente de atenuación para el modo 1, polarización H
alphak2: coeficiente de atenuación para el modo 1, polarización V
alphap1: coeficiente de atenuación para el modo 2, polarización H
alphap2: coeficiente de atenuación para el modo 2, polarización V
betak1: vector de coeficientes de dispersión para el modo 1, polarización H
betak2: vector de coeficientes de dispersión para el modo 1, polarización V
betap1: vector de coeficientes de dispersión para el modo 2, polarización H
betap2: vector de coeficientes de dispersión para el modo 2, polarización V
gammak: coeficiente de no-linealidad para el modo 1
gammap: coeficiente de no-linealidad para el modo 2
psp: estado propio de polarización
method: puede ser circular o elíptico
maxiter: número máximo de iteraciones
tol: tolerancia de convergencia

Comentar que se escoge utilizar el método de base circular ya que es más preciso que el método de base elíptica porque no descuida ningún término no lineal, aunque la desventaja del método circular es que el tamaño de pasos dz siempre debe ser mucho más pequeño que la longitud para producir resultados significativos. También añadir, que para modificar su sección no lineal, se ha utilizado la ecuación 26 del artículo “*Nonlinear Propagation in Multimode and Multicore Fibers: Generalization of the Manakov Equations*” [25].

La FMF se modela con los siguientes datos:

	Modo LP11	Modo LP01	Modo LP02
Longitud de onda	1550 nm	1550 nm	1550 nm
Dispersión	20 ps/(nm·km)	21.1 ps/(nm·km)	17.5 ps/(nm·km)
Slope	0.064 ps/(nm ² ·km)	0.066 ps/(nm ² ·km)	0.043 ps/(nm ² ·km)
Atenuación	0.2 dB/km	0.2 dB/km	0.2 dB/km
Mode Field Diameter	15.2 μm	18.2 μm	8.7 μm
f_{pppp}	1.0573	1	0.9742
f_{mmp}	0.35	0.1	0.1

Tabla 4. Características de la fibra extraídas del *datasheet* 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company [23].

El código utilizado está en el Anexo 6.3. y 6.4.: **MainFMF3** y **ssprovFMF3***.

***NOTA:** Realmente, este código es para la implementación de tres modos (se explicará más adelante), pero añadir en el Anexo del trabajo todo el código *solo* para dos modos cuando éste ya lo incluye me parecía redundante.

3.2.1. Propagación por los modos LP11a y LP11b

Se transmite un pulso gaussiano por el modo LP11a horizontal, mientras que por LP11a vertical y por LP11b (horizontal y vertical) se transmite un vector de ceros para comprobar si hay acoplo entre modos.

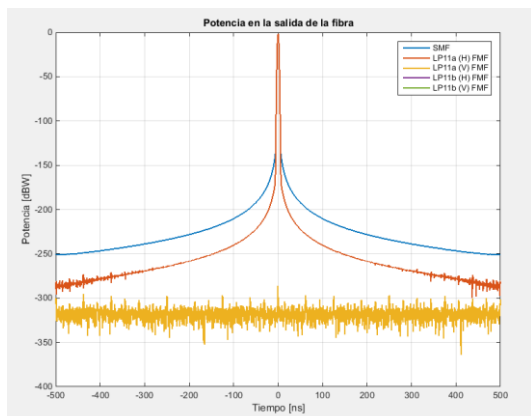


Figura 18. Se transmite pulso por LP11a H.

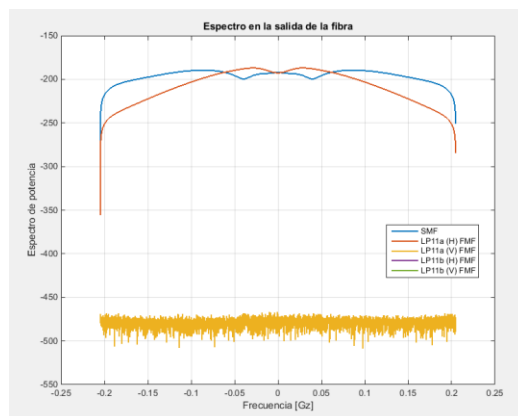


Figura 19. Se transmite pulso por LP11a H.

En estas gráficas se puede comparar la salida de la FMF con la SMF. Se puede observar en la Figura 18 como la salida de la FMF está más atenuada para los instantes diferentes a 0 y, por tanto, el pulso es más estrecho. Además, en la Figura 19, en el espectro también se observa esta atenuación en algunas frecuencias.

El modo LP11 sufre considerablemente de XPM intermodal debido a su naturaleza degenerativa que permite que los pares de modos LP11a y LP11b se propaguen a la misma velocidad de grupo. Por tanto, esta atenuación es en parte debida al efecto XPM intermodal, cuyo coeficiente para los modos LP11a y LP11b es de un valor de 0.35.

Por otro lado, en las gráficas vemos que el modo LP11b con polarización horizontal no aparece, esto quiere decir que no interfiere al igual que su polarización vertical. Solo se observa ruido en la polarización vertical de LP11a pero con un nivel muy bajo.

Se podría haber hecho el mismo análisis transmitiendo el pulso gaussiano solo por el modo LP11b, pero los resultados serían iguales. Esto se puede comprobar en las siguientes figuras, donde se transmite el mismo pulso gaussiano por cada uno de los modos:

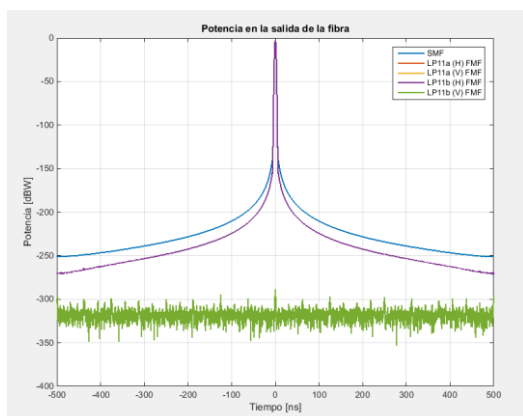


Figura 20. Se transmiten pulsos por LP11a H y LP11b H.

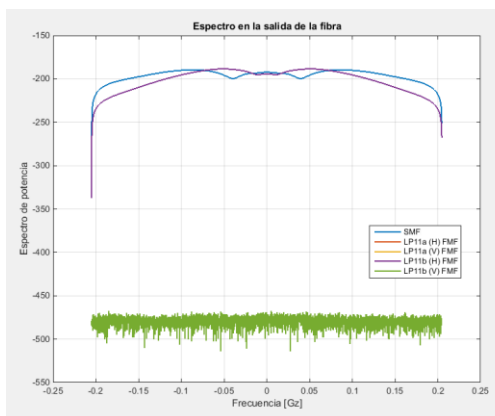


Figura 21. Se transmiten pulsos por LP11a H y LP11b H.

En estas Figuras 20 y 21 podemos ver como solo aparece reflejada la salida del modo LP11b. Esto es así porque LP11a y LP11b son simétricos y, por tanto, en las gráficas están totalmente solapados y LP11b se dibuja sobre la salida de LP11a.

Comparando estas gráficas con las Figuras 18 y 19, podemos apreciar como al transmitir el pulso por ambos modos, la atenuación disminuye y en la salida el nivel de potencia es ligeramente superior.

3.2.2. Propagación por los modos LP01 y LP02

Se transmite el pulso gaussiano por el modo LP01 con polarización horizontal, y su polarización vertical y el LP02 se mantienen a cero.

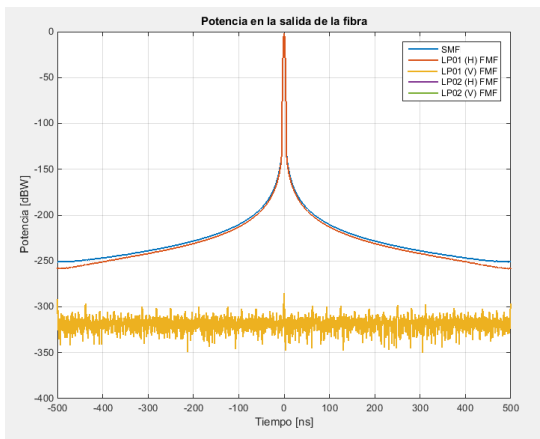


Figura 22. Se transmite pulso por LP01 H.

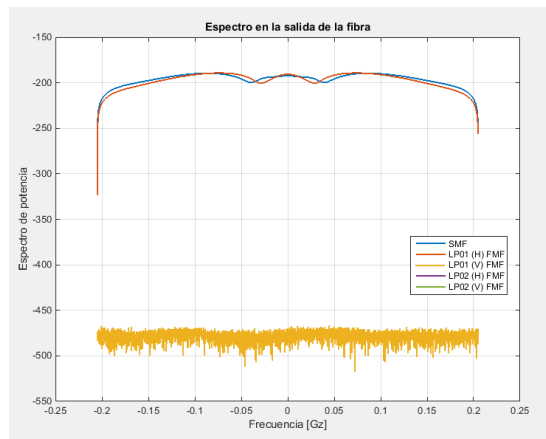


Figura 23. Se transmite pulso por LP01 H.

En las Figuras 22 y 23 se puede ver como el pulso gaussiano transmitido por el modo LP01 tiene un comportamiento muy parecido a cuando es transmitido por SMF.

Es un resultado esperado ya que el modo LP01 es el modo fundamental.

Comentar que solo se ve representado un ruido muy bajo debido a la polarización vertical de LP01 y que no se aparece ninguna señal por el modo LP02, por tanto, no hay acoplo.

A continuación, se transmite el pulso gaussiano por el modo LP02 (ya que éste no es simétrico al LP01, como sucedía en el anterior caso con LP11a y LP11b).

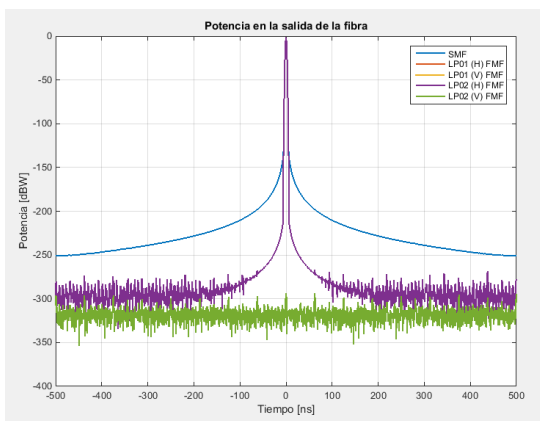


Figura 24. Se transmite pulso por LP02 H.

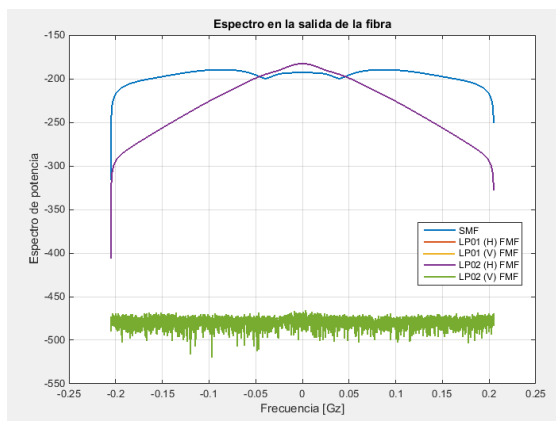


Figura 25. Se transmite pulso por LP02 H.

Se puede observar un comportamiento muy diferente al modo anterior LP01 y, en consecuencia, a la salida de la SMF.

En la Figura 24, el modo LP02 con polarización horizontal presenta un pico muy estrecho en el instante cero y en el resto su valor de potencia es muy bajo, apenas superior a la salida en la polarización vertical (lo cual es considerado ruido). Mientras que en la Figura 25, en el espectro de potencia se ve reducido en todas las frecuencias excepto en la central.

Este comportamiento puede ser debido a que –además de tener un valor muy pequeño de coeficiente XPM intermodal (como el modo LP01)– el modo LP02 es el que tiene valores de dispersión y pendiente de dispersión más bajos.

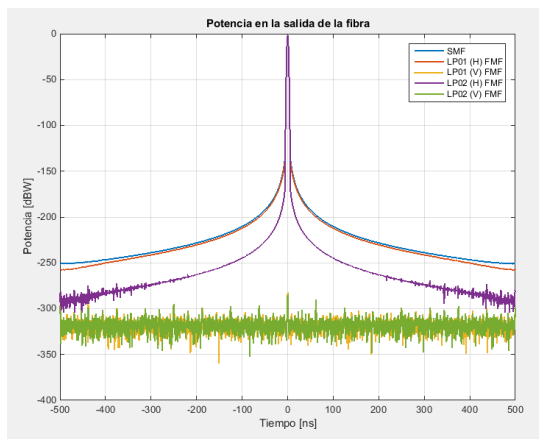


Figura 26. Se transmiten pulsos por LP01 H y LP02 H.

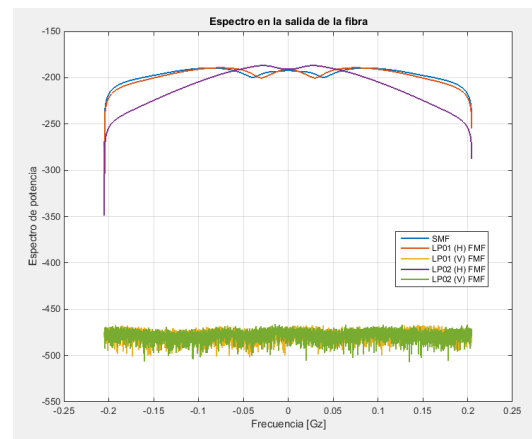


Figura 27. Se transmiten pulsos por LP01 H y LP02 H.

En las Figuras 26 y 27 se muestran los resultados cuando se transmite un pulso gaussiano tanto por el modo LP01 como por el LP02.

Se puede observar como el comportamiento del modo LP01 apenas cambia, sigue siendo muy parecido al transmitir por la SMF. En cambio, el modo LP02 sí varía. Su nivel de potencia a la salida es más elevado para los instantes diferentes a cero (se distancia del ruido que aparece en las polarizaciones verticales) y el espectro de potencia presenta una gráfica de salida menos “brusca”.

3.3. Propagación por una FMF de 3 modos

A continuación, se ha decidido aumentar un modo más la FMF anterior, de manera que ahora tenemos un escenario con 3 modos.

Para ello, se han aplicado los mismos pasos que en el caso previo y se han aumentado las variables del código para dar cabida a este tercer modo con sus respectivas polarizaciones (**u0zH**, **u0zV**), coeficientes de atenuación (**alpham1**, **alpham2**), vectores de coeficientes de dispersión (**betam1**, **betam2**) y coeficiente de no linealidad (**gammam**).

El código desarrollado completo está en el Anexo 6.3 y 6.4.: **MainFMF3** y **sspropFMF3**.

Para este análisis se han decidido utilizar los modos LP11a, LP11b y LP21.

Modo LP21	
Longitud de onda	1550 nm
Dispersión	21.4 ps/(nm·km)
Slope	0.056 ps/(nm ² ·km)
Atenuación	0.2 dB/km
Mode Field Diameter	14.3 μm
f_{pppp}	0.9410
f_{mmp}	0.92

Tabla 5. Características de la fibra especificadas en el *datasheet* 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company [23].

Como de este último modo no habíamos analizado su comportamiento en solitario, se hace en el siguiente apartado.

3.3.1. Propagación por el modo LP21

Como no se había realizado este análisis previamente, se transmite un pulso gaussiano solo por el modo LP21 con polarización horizontal, mientras que con polarización vertical y por los demás modos (LP11a y LP11b) se transmite un vector de ceros.

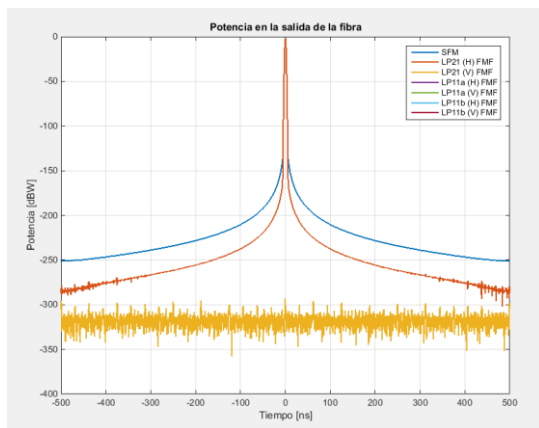


Figura 28. Se transmite pulso por LP21 H.

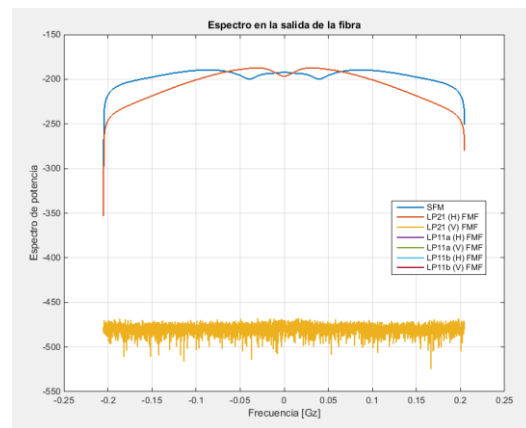


Figura 29. Se transmite pulso por LP21 H.

En estas figuras se puede observar como los modos LP11a y LP11b no interfieren, solo se ve representado el modo LP21.

Si se comparan estas gráficas con las Figuras 18 y 19, se observa que el modo LP21 tiene un comportamiento muy similar al del modo LP11. A primera vista puede sorprender, ya que el modo LP21 tiene un coeficiente de XPM intermodal de 0.92 mientras que el del modo LP11 es de 0.35, pero hay otros factores que influyen. Por ejemplo, el valor de dispersión y de pendiente de dispersión (*dispersion slope*) es más reducido en LP21 que en LP11. Lo cual puede llevar a que, en conjunto teniendo en cuenta todos los parámetros, presenten un comportamiento parecido.

3.3.2. Propagación de un pulso por cada uno de los modos y análisis para diferentes valores de atenuación

Se transmite un pulso gaussiano por cada uno de los modos con polarización horizontal (LP11a H, LP11b H y LP21 H) y con una atenuación de 0.2 dB/km (mismo valor de atenuación que en todos los casos realizados hasta el momento).

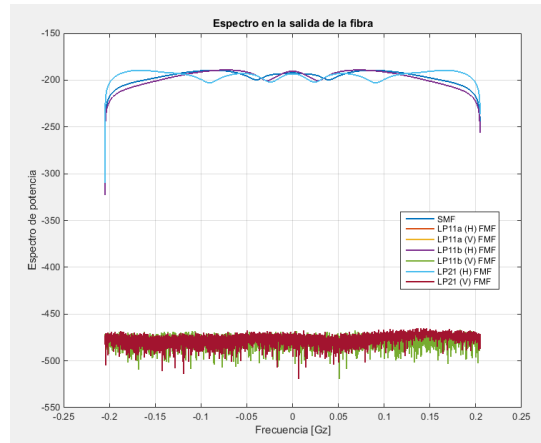
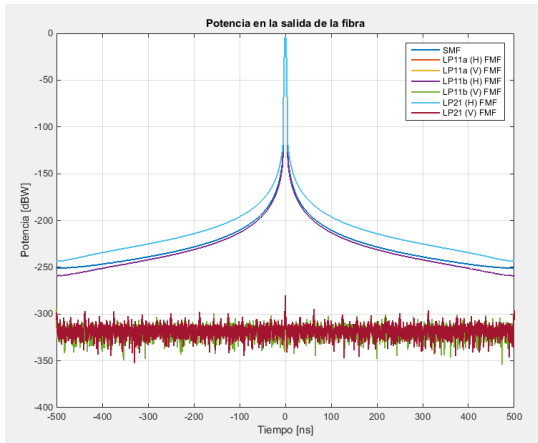


Figura 30. Se transmite con atenuación 0.2 dB/km. **Figura 31.** Se transmite con atenuación 0.2 dB/km.

En las Figuras 30 y 31 se observa como el comportamiento a la salida de la SMF es muy similar a la de los modos LP11a y LP11b (y estos idénticos entre sí) mientras que la salida del modo LP21 tiene un nivel de potencia de salida superior y deja pasar más frecuencias.

A continuación, se varía el parámetro de la atenuación para ver cómo afecta a la potencia en la salida de la fibra cuando se transmite por tres modos.

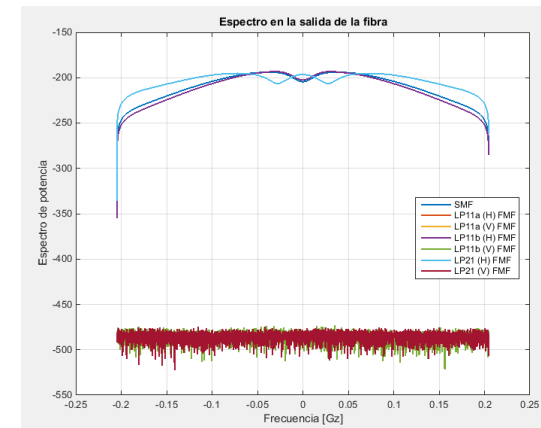
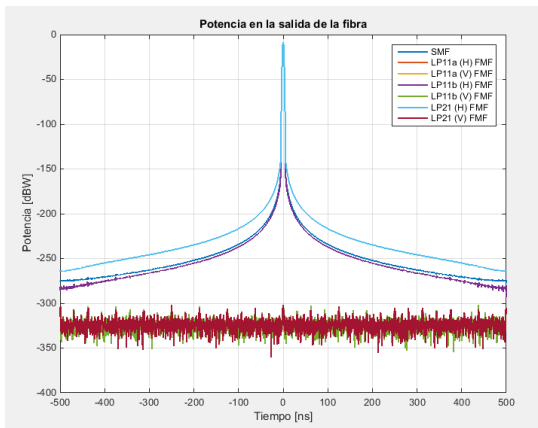


Figura 32. Se transmite con atenuación 0.8 dB/km. **Figura 33.** Se transmite con atenuación 0.8 dB/km.

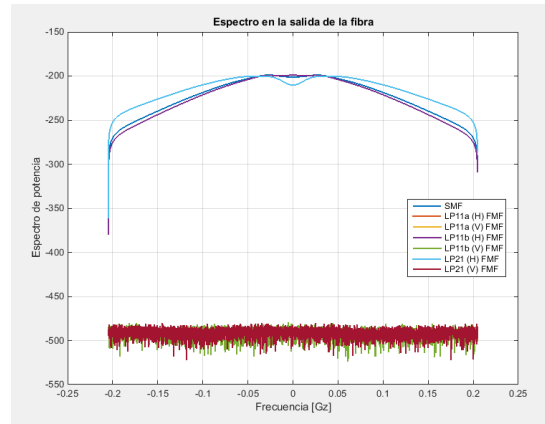
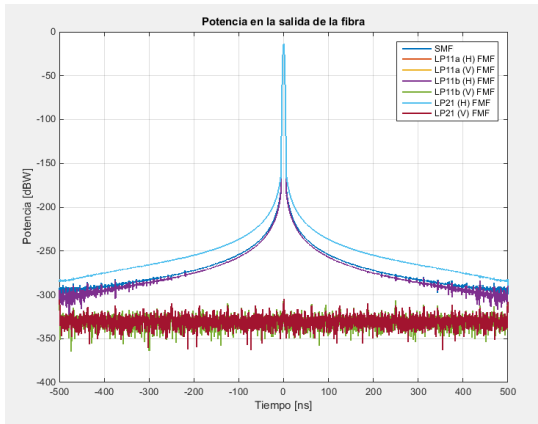


Figura 34. Se transmite con atenuación 1.4 dB/km. **Figura 35.** Se transmite con atenuación 1.4 dB/km.

Al observar todas estas gráficas (Figuras 30-35), se puede ver como a medida que aumenta el valor de la atenuación, la potencia a la salida se ve reducida y el espectro de potencia presenta disminuciones para algunas frecuencias.

3.3.3. Análisis de la potencia de salida para diferentes distancias de fibra

Previamente comentar, que para obtener las gráficas que se obtienen en este apartado, se ha modificado ligeramente el código del **MainFMF3** y se ha obtenido el código **Main3FMFdist**, que puede encontrarse en el Anexo 6.5.

Siguiendo con la transmisión del mismo pulso gaussiano por los modos LP11a, LP11b y LP21 con polarización horizontal, se analiza la potencia media en la salida de la fibra para diferentes distancias.

Comentar que la polarización vertical de estos modos no se ha tenido en cuenta porque daban valores muy bajos de potencia y que la distancia máxima escogida es de 200 km, ya que podría ser una distancia utilizada para dar servicio de fibra óptica a una red de metro.

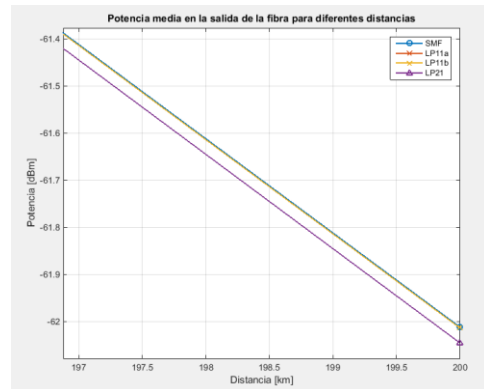
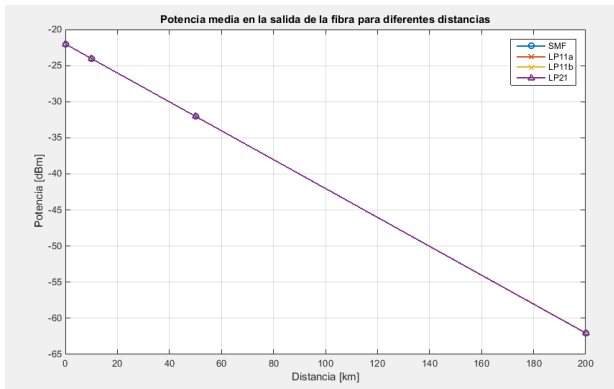


Figura 36. Potencia vs Distancia transmitiendo el mismo pulso. **Figura 37.** Ampliación de la figura de la izquierda.

En la Figura 36 se puede observar como la potencia media de salida de los tres modos y de la salida de la SMF es prácticamente igual. Esto es así porque las potencias más altas son las que dominan y, en los resultados obtenidos en gráficas anteriores donde se transmitía solo por el modo LP11a, LP11b y LP21 respectivamente, la parte donde se dibujaba el pico del pulso es casi igual para todos los modos (y si se transmitía por más de un modo había solapamiento en esa zona).

Aun así la potencia media no es idéntica, por eso, al ampliar en la Figura 37 vemos que la potencia de salida del modo LP21 es ligeramente inferior.

Comentar también que la recta de la gráfica muestra un comportamiento decreciente, lo cual se traduce en que a medida que aumenta la distancia, el valor de la potencia disminuye.

A continuación, se transmite por los tres modos como anteriormente pero en esta ocasión se transmiten tres pulsos gaussianos diferentes.

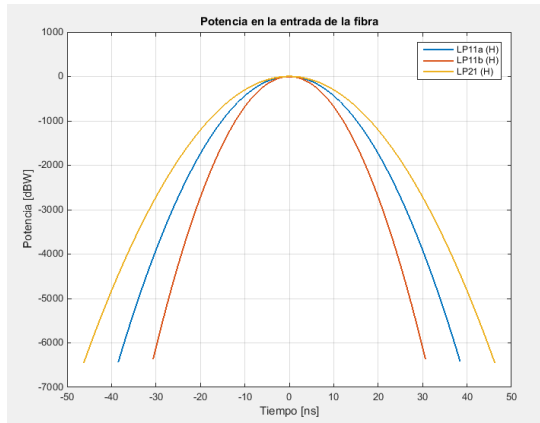


Figura 38. Potencia vs Tiempo en la entrada.

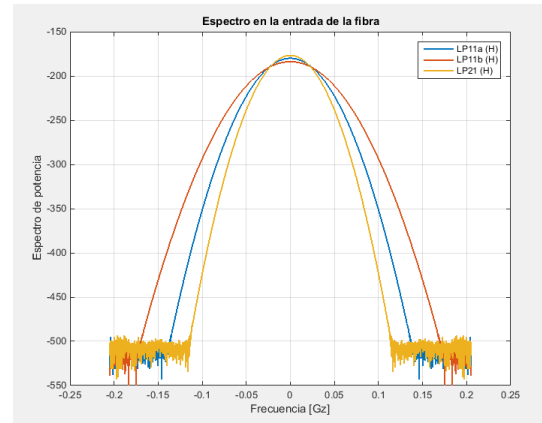


Figura 39. Potencia vs Frecuencia en la entrada.

Para conseguir tres pulsos diferentes, se varía la amplitud y la anchura del pulso gaussiano en cada uno de los modos. Para el modo LP11a se dejan los mismos valores que habían, para el modo LP11b se escoge un valor inferior y para el modo LP21 un valor mayor.

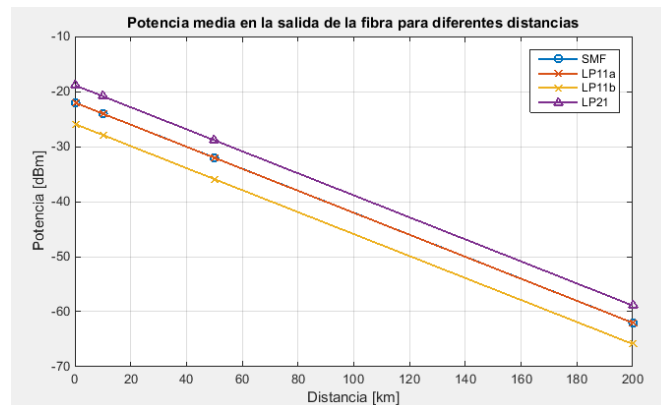


Figura 40. Potencia vs Distancia transmitiendo diferentes pulsos.

En este caso, en la Figura 40 si se puede apreciar los diferentes valores de potencia media de cada modo para una cierta distancia.

La potencia media de salida del modo LP11a es igual que el de la salida de la SMF porque tienen el mismo pulso gaussiano. En cambio, se observa que el modo con un pulso más ancho en tiempo (y más estrecho en frecuencia) –el LP21– es el que mantiene un nivel de potencia mayor en la salida mientras que el pulso más estrecho en tiempo (y más ancho en frecuencia) –el LP11b– tiene menos potencia media de salida a medida que aumenta la distancia.

4. CONCLUSIONES

Las fibras ópticas monomodo (SMF), debido a las limitaciones que imponen las no linealidades, tienen un máximo de capacidad de transmisión. El límite teórico impuesto sobre las SMF está establecido por el teorema de Shannon, como se comentó en la introducción de este proyecto.

Para superar este obstáculo, se buscan diferentes alternativas, todas enfocadas a superar la capacidad de transmisión. Es por ello que la solución se basa en transmitir múltiples canales ópticos, lo cual se logra con la multiplexación por división en el espacio (SDM).

Tras los resultados obtenidos, podemos ver cómo, efectivamente, se consigue aumentar la capacidad con las fibras de pocos modos (FMF).

En este proyecto se ha logrado transmitir por dos y tres modos, manteniendo un comportamiento cercano al obtenido cuando se transmite por SMF y, en ocasiones, mejor (al presentar menos dispersión). Esto se traduce en que se puede duplicar (en el caso de dos modos) y triplicar (en el caso de tres modos) la capacidad de transmisión por una fibra óptica sin sobrepasar el límite establecido por Shannon.

Además, esto se logra sin tener que aumentar la potencia, lo cual sería perjudicial porque aumenta las no linealidades y disminuye el rendimiento.

En el caso donde se estudia el nivel de potencia a la salida de la fibra versus la distancia, se puede concluir que transmitir pulsos más estrechos en frecuencia presenta mejores resultados en el nivel de potencia de salida para diferentes distancias.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Jose Antonio Castillo. (2019). *Fibra óptica: qué es, para qué se usa y cómo funciona*. Recuperado de: <https://www.profesionalreview.com/2019/02/15/fibra-optica-que-es/>
- [2] José L. Fernández. *Reflexión y refracción de ondas*. Recuperado de: <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-ondas#contenidos>
- [3] Carmen Vázquez García. (2019). *Módulo 2: Propagación en fibras ópticas*. Recuperado de: <http://ocw.uc3m.es/tecnologia-electronica/dispositivos-y-medios-de-transmision-opticos/material-de-clase-1/modulo-2-propagacion-en-fibras-opticas>
- [4] *Modos de propagación*. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Modos_de_propagaci%C3%B3n
- [5] (2012). *Modos de propagación*. Recuperado de: <http://guiasdeonda-sanchez.blogspot.com/2012/12/modos-de-propagacion.html>
- [6] FS.COM. (2013). *Fiber Optic Transmission Multiplexing Techniques*. Recuperado de: <https://community.fs.com/blog/fiber-optic-transmission-multiplexing-technique.html>
- [7] Yurico D. L. (2013). *Multiplexación por división en frecuencia*. Recuperado de: <http://yuricodeaotelecomunicaciones.blogspot.com/2012/03/1-multiplexacion-por-division-en.html>
- [8] Pablo Turmero. (2018). *Multicanalización por división de longitud de onda*. Recuperado de: <https://www.monografias.com/docs110/multicanalizacion-division-longitud-onda/multicanalizacion-division-longitud-onda.shtml>
- [9] Jhon Brandon Morales. (2018). *Multiplexación por división en tiempo (TDM)*. Recuperado de: <http://telecomunicaciones-itiguala.blogspot.com/2018/11/51-multiplexacion-por-division-de.html>
- [10] Takayuki Mizuno; Yutaka Miyamoto. "High-capacity dense space division multiplexing transmission". NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation. Japón (2017).
- [11] Carlos. B. G. (2009). *Multiplexación*. Recuperado de: <https://vidateleco.wordpress.com/2009/09/16/multiplexacion-parte-1/>
- [12] Carlos Ventura Luyo. (2010). *Métodos de multiplexación*. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/venturaluyo/grupo-4-metodos-de-multiplexacion>
- [13] D.J. Richardson; J. M. Fini; L. E. Nelson. "Space division multiplexing in optical fibers". *Nature photonics* (2013).
- [14] Jim Zimnicki. (2019). *Singlemode vs. Multimode fiber: the real differences*. Recuperado de: <https://www.belden.com/blog/smart-building/singlemode-multimode-fiber-differences>
- [15] V. J. F. Rancaño; S. Jain; T. C. May-Smith; J. K. Sahu; P. Petropoulos; D. J. Richardson. "Multi-element fiber technology for high-capacity optical communication systems". *Optoelectronic Research Centre*. Southampton (2014).
- [16] Erik Argell. "Roadmap of optical communications". (2016).
- [17] K. Saitoh; S. Matsuo. "Multicore fiber technology". *The Optical Society* (2016).

- [18] World Intellectual Property Organization. “*Optical transmission using few-mode fibers*”. (2011).
- [19] F. Polletti; M. N. Petrovich; D. J. Richardson. “*Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications*”. Nanophotonics (2013).
- [20] Mohammed Hafezi. (2010). *Switching of light with light using cold atoms inside a hollow optical fiber*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Hollow-core-photonic-bandgap-fiber-The-diameter-of-the-inner-hole-where-the-atoms-are_fig1_228942452
- [21] NTK Photonics. *Hollow core photonic crystal fibers*. Recuperado de: <https://www.nktphotonics.com/lasers-fibers/product/hollow-core-photonic-crystal-fibers/>
- [22] Corning. *SMF-28e+ Optical Fiber*. Recuperado de: https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/P11463_07-14_English.pdf
- [23] A Furukawa Company. *Four Mode Step-Index Fiber*. Recuperado de: [www.ofsoptics.com Item # 60817](http://www.ofsoptics.com/Item_#_60817)
- [24] Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (2007). *Modos guiados en fibras ópticas*. Recuperado de: http://www.tfo.upm.es/docencia/2007-08/LIBRO_LCOP/Desarrollo_PE4.pdf
- [25] S. Mumtaz; R-J Essiambre. “*Nonlinear Propagation in Multimode and Multicore Fibers: Generalization of the Manakov Equations*”. Journal of Lightwave Technology (2013).
- [26] Le Nguyen Binh. “*Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models*”. Huawei Technologies CO.; LTD.; European Research Center Muenchen, Germany (2014).
- [27] Andrés González García (2007). “*Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s*”. Recuperado de: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/587/1/12251.pdf>
- [28] NLSE (Non-linear Schrödinger Equation). Recuperado de: http://optilux.sourceforge.net/Documentation/optilux_doc/NLSE.html
- [29] Fosco Connect (2019). *What is birefringence and beat length?*. Recuperado de: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95042886-what-is-birefringence-and-beat-length>
- [30] *Self-phase Modulation*. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Self-phase_modulation
- [31] Kokyo INC. *Split Step Fourier Method*. Recuperado de: <https://en.symphotony.com/fiber-lasers/split-step-fourier/>
- [32] *Chapter IV: Numerical solutions to the nonlinear Schrödinger equation*. Recuperado de: https://www.phys.ksu.edu/personal/washburn/pdf/washburn_thesis_chapter4.pdf
- [33] Exfiber (2015). *Polarization Dependent Loss*. Recuperado de: <https://www.exfiber.com/old/tutorial-os/Polarization-Dependent-Loss-32.html>
- [34] Photonics Research Laboratory, University of Maryland. Guide to vector versión (sspropv,sspropvc). Recuperado de: <https://www.photonics.umd.edu/software/ssprop/vector-version/>

6. ANEXO

6.1. MainSMF

```

clear all; close all;

% INPUTS

Ao = 1; % Pulse Amplitude
to = 1e-9; % Pulse Width [s]
nt = 2^12; % Number of points
T = 1e-6; % Period [s]
dt = T/nt; % Time Step
t = (1:nt)'-(nt+1)/2*dt; % Time Vector
u0 = Ao*exp(-t.^2/(2*(to^2))); % Gaussian Pulse, chirp=0

ztotal = 1e3; % Distance [m] 1KM
ztotal2 = 10e3; % Distance [m] 10KM
ztotal3 = 50e3; % Distance [m] 50KM
ztotal4 = 100e3; % Distance [m] 100KM
ztotal5 = 500e3; % Distance [m] 500KM

dz = 10; % Propagation stepsize

nz = ztotal/dz; % Number of steps to take 1KM
nz2 = ztotal2/dz; % Number of steps to take 10KM
nz3 = ztotal3/dz; % Number of steps to take 50KM
nz4 = ztotal4/dz; % Number of steps to take 100KM
nz5 = ztotal5/dz; % Number of steps to take 500KM

alphadB = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m]
alphaa = log(10)*alphadB/10; % Power loss coefficient in linear

c = 3e8; % Light speed [m/s]
lambda = 1550*1e-9; % Wavelength
D = 18e-6; % Dispersión [s/m^2]
S = 0.092*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_2 = -((D*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_3 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*S-lambda^2*beta_2/(pi*c); % Beta_3
betapa = [0, 0, beta_2, beta_3]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD = 10.4e-6; % Mode field diameter [m]
n2 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff = pi*(MFD/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma = 2*pi*n2/(lambda*Aeff); % Nonlinearity coefficient

maxiter = 4; % Max number of iterations (default = 4)
tol = 1e-5; % Convergence tolerance (default = 1e-5)

% GAUSSIAN PULSE PROPAGATION IN A SINGLE MODE FIBER WITH SSPROP
tic;
[u1]=ssprop(u0, dt, dz, nz, alphaa, betapa, gamma); %1 km
[u2]=ssprop(u0, dt, dz, nz2, alphaa, betapa, gamma); % 10 km
[u3]=ssprop(u0, dt, dz, nz3, alphaa, betapa, gamma); % 50 km
[u4]=ssprop(u0, dt, dz, nz4, alphaa, betapa, gamma); % 100 km
[u5]=ssprop(u0, dt, dz, nz5, alphaa, betapa, gamma); % 500 km
toc;

% GRAPHIC IN THE INPUT
figure(1);
plot(t/1e-9,20*log10(u0), 'b', 'linewidth', 1.2);
xlabel ('Tiempo [ns]');
ylabel ('Potencia [dBW]');
title ('Pulso en la entrada de la fibra');
grid on;

% GRAPHIC IN THE OUTPUT
figure(2);
plot(t/1e-9,20*log10(abs(u1)),t/1e-9,20*log10(abs(u2)),t/1e-9,20*log10(abs(u3)),t/1e-
9,20*log10(abs(u4)),t/1e-9,20*log10(abs(u5)), 'linewidth', 1.2);
xlabel ('Tiempo [ns]');
ylabel ('Potencia [dBW]');

```

```

legend ('d = 1km','d = 10 km','d = 50 km','d = 100 km','d = 500 km');
title ('Pulsos en la salida de la fibra para diferentes distancias');
grid on;

```

6.2. Ssprop

```

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

% 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(betap)-1;
    halfstep = halfstep - j*betap(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

```

6.3. MainFMF3

```

clear all; close all;

% INPUTS
Ao = 1; % Pulse Amplitude
to = 1e-9; % Pulse Width [s]
nt = 2^12; % Number of points
T = 1e-6; % Period [s]
dt = T/nt; % Time Step
t = (1:nt)'-(nt+1)/2*dt; % Time Vector

u0xH = Ao*exp(-t.^2/(2*(to^2))); % Modo 1 polarización H (Gaussian Pulse, chirp=0)
u0xV = zeros(size(u0xH)); % Modo 1 polarización V (Vector of zeros)
u0yH = u0xH; % Modo 2 polarización H
u0yV = zeros(size(u0xH)); % Modo 2 polarización V
u0zH = u0xH; % Modo 3 polarización H
u0zV = zeros(size(u0xH)); % Modo 3 polarización V

w = wspace(T,nt); % Angular Frequency Vector
f = fftshift(w/(2*pi)); % Frequency

ztotal = 10e3; % Distance [m] 10KM
dz = 10; % Propagation stepsize
nz = ztotal/dz; % Number of steps to take 1KM

%% SSMF parameters %%
alphadB = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m]
alphaa = log(10)*alphadB/10; % Power loss coefficient in linear

c = 3e8; % Light speed [m/s]
lambda = 1550*1e-9; % Wavelength

D = 17e-6; % Dispersión [s/m^2]
S = 0.092*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_2 = -((D*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_3 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*S-lambda^2*beta_2/(pi*c); % Beta_3
betapa = [0, 0, beta_2, beta_3]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD = 10.4e-6; % Mode field diameter [m]
n2 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff = pi*(MFD/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma = 2*pi*n2/(lambda*Aeff); % Nonlinearity coefficient

%% FMF parameters %%
%LP11
alphadB11 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha11 = log(10)*alphadB11/10; % Power loss coefficient in linear

DLP11 = 22e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP11 = 0.064*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_211 = -((DLP11*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_311 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP11-lambda^2*beta_211/(pi*c); % Beta_3
betap11 = [0, 0, beta_211, beta_311]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD11 = 15.2e-6; % Mode field diameter [m]
n211 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff11 = pi*(MFD11/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma11 = 2*pi*n211/(lambda*Aeff11); % Nonlinearity coefficient

%LP01
alphadB01 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha01H = log(10)*alphadB01/10; % Power loss coefficient in linear
alpha01V = log(10)*alphadB01/10; % Power loss coefficient in linear

DLP01 = 21.1e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP01 = 0.066*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_201 = -((DLP01*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_301 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP01-lambda^2*beta_211/(pi*c); % Beta_3
betap01H = [0, 0, beta_201, beta_301]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

```

```

betap01V = [0, 0, beta_201, beta_301];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD01 = 18.2e-6; % Mode field diameter [m]
n201 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff01 = pi*(MFD/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma01 = 2*pi*n201/(lambda*Aeff01); % Nonlinearity coefficient

%LP02
alphadB02 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha02H = log(10)*alphadB02/10; % Power loss coefficient in linear
alpha02V = log(10)*alphadB02/10; % Power loss coefficient in linear

DLP02 = 17.5e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP02 = 0.043*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_202 = -((DLP02*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_302 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP02-lambda^2*beta_202/(pi*c); % Beta_3
betap02H = [0, 0, beta_202, beta_302];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]
betap02V = [0, 0, beta_202, beta_302];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD02 = 15.2e-6; % Mode field diameter [m]
n202 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff02 = pi*(MFD02/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma02 = 2*pi*n202/(lambda*Aeff02); % Nonlinearity coefficient

%LP21
alphadB21 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha21H = log(10)*alphadB21/10; % Power loss coefficient in linear
alpha21V = log(10)*alphadB21/10; % Power loss coefficient in linear

DLP21 = 21.4e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP21 = 0.056*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_221 = -((DLP02*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_321 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP02-lambda^2*beta_202/(pi*c); % Beta_3
betap21H = [0, 0, beta_221, beta_321];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]
betap21V = [0, 0, beta_221, beta_321];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD21 = 14.3e-6; % Mode field diameter [m]
n221 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff21 = pi*(MFD21/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma21 = 2*pi*n221/(lambda*Aeff21); % Nonlinearity coefficient

alphak1 = alpha11; % Generic alpha value, 1st mode polarization H
alphak2 = alpha11; % Generic alpha value, 1st mode polarization V
alphap1 = alpha11; % Generic alpha value, 2nd mode polarization H
alphap2 = alpha11; % Generic alpha value, 2nd mode polarization V
alpham1 = alpha21H; % Generic alpha value, 3rd mode polarization H
alpham2 = alpha21V; % Generic alpha value, 3rd mode polarization V

betak1 = betap11; % Generic beta value, 1st mode polarization H
betak2 = betap11; % Generic beta value, 1st mode polarization V
betap1 = betap11; % Generic beta value, 2nd mode polarization H
betap2 = betap11; % Generic beta value, 2nd mode polarization V
betam1 = betap21H; % Generic beta value, 3rd mode polarization H
betam2 = betap21V; % Generic beta value, 3rd mode polarization V

gammak = gammal1; % Generic gamma value, 1st mode
gammap = gammal1; % Generic gamma value, 2nd mode
gammam = gamma21; % Generic gamma value, 3rd mode

psp = 0; % Polarization eigenstate (PSP) of fiber
method = 'circular'; % Method to use (default = 'elliptical')
maxiter = 4; % Max number of iterations (default = 4)
tol = 1e-5; % Convergence tolerance (default = 1e-5)

% GAUSSIAN PULSE PROPAGATION IN A SINGLE MODE FIBER WITH SSPROP
tic;
[ulxH_smf]=ssprop(u0xH, dt, dz, nz, alphaa, betapa, gamma);
toc;

```

```

% PROPAGATION IN A THREE MODE FIBER (WITH POLARIZATIONS H AND V) WITH SSPROP V
tic;
[ulxH,ulxV,ulyH,ulyV,ulzH,ulzV]=sspropvFMF3(u0xH,u0xV,u0yH,u0yV,u0zH,u0zV,dt,dz,nz,alpha
k1,alphak2,alphap1,alphap2,alphan1,alphan2,betak1,betak2,betap1,betap2,betam1,betam2,gam
mak,gammak,gammam,psp,method,maxiter,tol);
toc;

% IN FREQUENCY DOMAIN
U0XH = fftshift(abs(dt*fft(u0xH)/sqrt(2*pi)).^2);
U0YH = fftshift(abs(dt*fft(u0yH)/sqrt(2*pi)).^2);
U0ZH = fftshift(abs(dt*fft(u0zH)/sqrt(2*pi)).^2);
U1XH_SMF = fftshift(abs(dt*fft(ulxH_smf)/sqrt(2*pi)).^2);
U1XH = fftshift(abs(dt*fft(ulxH)/sqrt(2*pi)).^2);
U1XV = fftshift(abs(dt*fft(ulxV)/sqrt(2*pi)).^2);
U1YH = fftshift(abs(dt*fft(ulyH)/sqrt(2*pi)).^2);
U1YV = fftshift(abs(dt*fft(ulyV)/sqrt(2*pi)).^2);
U1ZH = fftshift(abs(dt*fft(ulzH)/sqrt(2*pi)).^2);
U1ZV = fftshift(abs(dt*fft(ulzV)/sqrt(2*pi)).^2);

% GRAPHIC IN THE INPUT
figure(1);
plot(t/1e-9,20*log10(u0xH),t/1e-9,20*log10(u0yH),t/1e-9,20*log10(u0zH),'linewidth',
1.2);
xlabel('Tiempo [ns]');
ylabel('Potencia [dBW]');
legend('LP11a (H)','LP11b (H)', 'LP21 (H)');
title('Potencia en la entrada de la fibra');
grid on;

% GRAPHIC IN THE OUTPUT
figure(2);
plot(t/1e-9,20*log10(abs(ulxH_smf)),t/1e-9,20*log10(abs(ulxH)),t/1e-
9,20*log10(abs(ulxV)),t/1e-9,20*log10(abs(ulyH)),t/1e-9,20*log10(abs(ulyV)),t/1e-
9,20*log10(abs(ulzH)),t/1e-9,20*log10(abs(ulzV)),'linewidth', 1.2);
xlabel('Tiempo [ns]');
ylabel('Potencia [dBW]');
legend('SMF','LP11a (H) FMF','LP11a (V) FMF','LP11b (H) FMF','LP11b (V) FMF','LP21 (H)
FMF','LP21 (V) FMF');
title('Potencia en la salida de la fibra');
grid on;

% GRAPHIC POWER SPECTRUM IN THE INPUT
figure(3);
plot(f/10e9,10*log10(U0XH),f/10e9,10*log10(U0YH),f/10e9,10*log10(U0ZH),'linewidth',
1.2);
xlabel('Frecuencia [Gz]');
ylabel('Espectro de potencia');
legend('LP11a (H)','LP11b (H)', 'LP21 (H)');
title('Espectro en la entrada de la fibra');
grid on;

% GRAPHIC POWER SPECTRUMS IN THE OUTPUT
figure(4);
plot
(f/10e9,10*log10(U1XH_SMF),f/10e9,10*log10(U1XH),f/10e9,10*log10(U1XV),f/10e9,10*log10(U
1YH),f/10e9,10*log10(U1YV),f/10e9,10*log10(U1ZH),f/10e9,10*log10(U1ZV),'linewidth',
1.2);
xlabel('Frecuencia [Gz]');
ylabel('Espectro de potencia');
legend('SMF','LP11a (H) FMF','LP11a (V) FMF','LP11b (H) FMF','LP11b (V) FMF','LP21 (H)
FMF','LP21 (V) FMF');
title('Espectro en la salida de la fibra');
grid on;

```

6.4. SspropFMF3

```

function [ulxH,ulxV,ulyH,ulyV,ulzH,ulzV] =
sspropvFMF3(u0xH,u0xV,u0yH,u0yV,u0zH,u0zV,dt,dz,nz,alphak1,alphak2,alphap1,alphap2,alpha
m1,alphan2,betak1,betak2,betap1,betap2,betam1,betam2,gammak,gammak,gammam,psp,method,max
iter,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.
%
% 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

nt = length(u0xH);
w = 2*pi*[(0:nt/2-1),(-nt/2:-1)]'/(dt*nt) ;

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

if (length(alphak1) == nt) % If the user manually specifies alpha(w)
    ha = -alphak1/2;
else
    ha = 0;
    for ii = 0:length(alphak1)-1;
        ha = ha - alphak1(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    ha = ha/2;
end

if (length(betak1) == nt) % If the user manually specifies beta(w)
    ha = ha - j*betak1;
else
    for ii = 0:length(betak1)-1;

```

```

    ha = ha - j*betak1(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
end
end

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

if (length(alphak2) == nt)
    hb = -alphak2/2;
else
    hb = 0;
    for ii = 0:length(alphak2)-1;
        hb = hb - alphak2(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    hb = hb/2;
end

if (length(betak2) == nt)
    hb = hb - j*betak2;
else
    for ii = 0:length(betak2)-1;
        hb = hb - j*betak2(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

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

%%%%%% SE AÑADE hc y hd
if (length(alphap1) == nt) % If the user manually specifies alpha(w)
    hc = -alphap1/2;
else
    hc = 0;
    for ii = 0:length(alphap1)-1;
        hc = hc - alphap1(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    hc = hc/2;
end

if (length(betap1) == nt) % If the user manually specifies beta(w)
    hc = hc - j*betap1;
else
    for ii = 0:length(betap1)-1;
        hc = hc - j*betap1(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

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

if (length(alphap2) == nt) % If the user manually specifies alpha(w)
    hd = -alphap2/2;
else
    hd = 0;
    for ii = 0:length(alphap2)-1;
        hd = hd - alphap2(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    hd = hd/2;
end

if (length(betap2) == nt) % If the user manually specifies beta(w)
    hd = hd - j*betap2;
else
    for ii = 0:length(betap2)-1;
        hd = hd - j*betap2(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

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

%%%%%% FIN DE 'SE AÑADE hc Y hd'

%%%%%% SE AÑADE he y hf
if (length(alpham1) == nt) % If the user manually specifies alpha(w)
    he = -alpham1/2;
else
    he = 0;
    for ii = 0:length(alpham1)-1;
        he = he - alpham1(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

```

```

    he = he/2;
end

if (length(betam1) == nt)      % If the user manually specifies beta(w)
    he = he - j*betam1;
else
    for ii = 0:length(betam1)-1;
        he = he - j*betam1(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

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

if (length(alpham2) == nt)    % If the user manually specifies alpha(w)
    hf = -alpham2/2;
else
    hf = 0;
    for ii = 0:length(alpham2)-1;
        hf = hf - alpham2(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
    hf = hf/2;
end

if (length(betam2) == nt)    % If the user manually specifies beta(w)
    hf = hf - j*betam2;
else
    for ii = 0:length(betam2)-1;
        hf = hf - j*betam2(ii+1)*(w).^ii/factorial(ii);
    end
end

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

%%%%%% FIN DE 'SE AÑADE he Y hf'

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

    % First, rotate coordinates to circular basis:
    u0a = (1/sqrt(2)).*(u0xH + j*u0xV);
    u0b = (1/sqrt(2)).*(j*u0xH + u0xV);
    u0c = (1/sqrt(2)).*(u0yH + j*u0yV);    % SE AÑADE otro modo (02)
    u0d = (1/sqrt(2)).*(j*u0yH + u0yV);    % SE AÑADE otro modo (02)
    u0e = (1/sqrt(2)).*(u0zH + j*u0zV);    % SE AÑADE otro modo (02)
    u0f = (1/sqrt(2)).*(j*u0zH + u0zV);    % SE AÑADE otro modo (03)

    % Propagation matrix for linear calculations (for 01 mode p)

    h11p = ( (1+sin(2*chi))*ha + (1-sin(2*chi))*hb )/2;
    h12p = -j*exp(+j*2*psi)*cos(2*chi)*(ha-hb)/2;
    h21p = +j*exp(-j*2*psi)*cos(2*chi)*(ha-hb)/2;
    h22p = ( (1-sin(2*chi))*ha + (1+sin(2*chi))*hb )/2;

    % Propagation matrix for linear calculations (for 02 mode k) % SE AÑADE

    h11k = ( (1+sin(2*chi))*hc + (1-sin(2*chi))*hd )/2;
    h12k = -j*exp(+j*2*psi)*cos(2*chi)*(hc-hd)/2;
    h21k = +j*exp(-j*2*psi)*cos(2*chi)*(hc-hd)/2;
    h22k = ( (1-sin(2*chi))*hc + (1+sin(2*chi))*hd )/2;

    % Propagation matrix for linear calculations (for 03 mode m) % SE AÑADE

    h11m = ( (1+sin(2*chi))*he + (1-sin(2*chi))*hf )/2;
    h12m = -j*exp(+j*2*psi)*cos(2*chi)*(he-hf)/2;
    h21m = +j*exp(-j*2*psi)*cos(2*chi)*(he-hf)/2;
    h22m = ( (1-sin(2*chi))*he + (1+sin(2*chi))*hf )/2;

    ula = u0a;
    ulb = u0b;
    ulc = u0c;    % SE AÑADE modo 02 (k)
    uld = u0d;    % SE AÑADE modo 02 (k)
    ule = u0e;    % SE AÑADE modo 03 (m)
    ulf = u0f;    % SE AÑADE modo 03 (m)
    uafft = fft(u0a);
    ubfft = fft(u0b);
    ucfft = fft(u0c);    % SE AÑADE modo 02 (k)
    udfft = fft(u0d);    % SE AÑADE modo 02 (k)
    uefft = fft(u0e);    % SE AÑADE modo 03 (m)

```



```

uffft = fft(u0f); % SE AÑADE modo 03 (m)

for iz = 1:nz,
    % Calculate 1st linear half
    uahalf = ifft( h11p.*uafft + h12p.*ubfft );
    ubhalf = ifft( h21p.*uafft + h22p.*ubfft );
    uchalf = ifft( h11k.*ucfft + h12k.*udfft ); % SE AÑADE modo 02 (k)
    udhalf = ifft( h21k.*ucfft + h22k.*udfft ); % SE AÑADE modo 02 (k)
    uehalf = ifft( h11m.*uefft + h12m.*uffft ); % SE AÑADE modo 03 (m)
    ufhalf = ifft( h21m.*uefft + h22m.*uffft ); % SE AÑADE modo 03 (m)
    for ii = 1:maxiter,

        fpppp11=1.0573; % SE AÑADE
        fmmpp11=0.35; % SE AÑADE
        fpppp01=1; % SE AÑADE
        fmmpp01=0.01; % SE AÑADE
        fpppp02=0.9742; % SE AÑADE
        fmmpp02=0.01; % SE AÑADE
        fpppp21=0.9410; % SE AÑADE
        fmmpp21=0.92; % SE AÑADE

        % Calculate nonlinear section % SE MODIFICA Y SE AÑADE
        uva = uahalf .* exp( (-j*(1/3)*gammak*dz).* ...
            (fpppp11*(8/9)*( 2*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0e).^2+abs(u1e).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0f).^2+abs(u1f).^2)/2 ) ) );

        uvb = ubhalf .* exp( (-j*(1/3)*gammak*dz).* ...
            (fpppp11*(8/9)*( 2*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0f).^2+abs(u1f).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0e).^2+abs(u1e).^2)/2 ) ) );

        uvc = uchalf .* exp( (-j*(1/3)*gammak*dz).* ...
            (fpppp11*(8/9)*( 2*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0e).^2+abs(u1e).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0f).^2+abs(u1f).^2)/2 ) ) );

        uvd = udhalf .* exp( (-j*(1/3)*gammak*dz).* ...
            (fpppp11*(8/9)*( 2*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 )+ fmmpp11*(4/3)*(
2*(abs(u0f).^2+abs(u1f).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0e).^2+abs(u1e).^2)/2 ) ) );

        uve = uehalf .* exp( (-j*(1/3)*gammak*dz).* ...
            (fpppp21*(8/9)*( 2*(abs(u0e).^2+abs(u1e).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 )+ fmmpp21*(4/3)*(
2*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 )+ fmmpp21*(4/3)*(
2*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0f).^2+abs(u1f).^2)/2 ) ) );

        uvf = ufhalf .* exp( (-j*(1/3)*gammak*dz).* ...
            (fpppp21*(8/9)*( 2*(abs(u0f).^2+abs(u1f).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0a).^2+abs(u1a).^2)/2 )+ fmmpp21*(4/3)*(
2*(abs(u0b).^2+abs(u1b).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0c).^2+abs(u1c).^2)/2 )+ fmmpp21*(4/3)*(
2*(abs(u0d).^2+abs(u1d).^2)/2 + ...
                4*(abs(u0e).^2+abs(u1e).^2)/2 ) ) );

        uva = fft(uva);
        uvb = fft(uvb);
        uvc = fft(uvc); % SE AÑADE modo 02 (k)
        uvd = fft(uvd); % SE AÑADE modo 02 (k)
        uve = fft(uve); % SE AÑADE modo 03 (m)
        uvf = fft(uvf); % SE AÑADE modo 03 (m)
    end
end

```

```

% Calculate 2nd linear half
uafft = h11p.*uva + h12p.*uvb;
ubfft = h21p.*uva + h22p.*uvb;
ucfft = h11k.*uvc + h12k.*ugd; % SE AÑADE modo 02 (k)
udfft = h21k.*uvc + h22k.*ugd; % SE AÑADE modo 02 (k)
uefft = h11m.*uve + h12m.*uvf; % SE AÑADE modo 03 (m)
uffft = h21m.*uve + h22m.*uvf; % SE AÑADE modo 03 (m)
uva = ifft(uafft);
uvb = ifft(ubfft);
uvc = ifft(ucfft); % SE AÑADE modo 02 (k)
ugd = ifft(udfft); % SE AÑADE modo 02 (k)
uve = ifft(uefft); % SE AÑADE modo 03 (m)
uvf = ifft(uffft); % SE AÑADE modo 03 (m)

if ( ( ( sqrt(norm(uva-ula,2).^2+norm(uvb-ulb,2).^2) / ...
        sqrt(norm(ula,2).^2+norm(ulb,2).^2) ) < tol ) || ( ( sqrt(norm(uvc-
ulc,2).^2+norm(ugd-uld,2).^2) / ...
        sqrt(norm(ulc,2).^2+norm(uld,2).^2) ) < tol ) || ( ( sqrt(norm(uve-
ule,2).^2+norm(uvf-ulf,2).^2) / ...
        sqrt(norm(ule,2).^2+norm(ulf,2).^2) ) < tol ) ) % SE AÑADE
    % tolerances met, break loop
    ula = uva;
    ulb = uvb;
    ulc = uvc; % SE AÑADE modo 02 (k)
    uld = ugd; % SE AÑADE modo 02 (k)
    ule = uve; % SE AÑADE modo 03 (m)
    ulf = uvf; % SE AÑADE modo 03 (m)

    break;
else
    % tolerances not met, repeat loop
    ula = uva;
    ulb = uvb;
    ulc = uvc; % SE AÑADE modo 02 (k)
    uld = ugd; % SE AÑADE modo 02 (k)
    ule = uve; % SE AÑADE modo 03 (m)
    ulf = uvf; % SE AÑADE modo 03 (m)
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;
u0c = ulc; % SE AÑADE modo 02 (k)
u0d = uld; % SE AÑADE modo 02 (k)
u0e = ule; % SE AÑADE modo 03 (m)
u0f = ulf; % SE AÑADE modo 03 (m)
end %end step iteration

% Rotate back to x-y basis:
ulxH = (1/sqrt(2)).*(ula-j*ulb) ;
ulxV = (1/sqrt(2)).*(-j*ula+ulb) ;
ulyH = (1/sqrt(2)).*(ulc-j*uld) ; % SE AÑADE modo 02 (k)
ulyV = (1/sqrt(2)).*(-j*ulc+uld) ; % SE AÑADE modo 02 (k)
ulzH = (1/sqrt(2)).*(ule-j*ulf) ; % SE AÑADE modo 03 (m)
ulzV = (1/sqrt(2)).*(-j*ule+ulf) ; % SE AÑADE modo 03 (m)

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;

    ula = u0a;
    ulb = u0b;

    uafft = fft(u0a);
    ubfft = fft(u0b);

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 ) || ( ( sqrt(norm(uvc-
        ulc,2).^2+norm(uvd-uld,2).^2) / ...
        sqrt(norm(ulc,2).^2+norm(uld,2).^2) ) < tol ) ) % SE AÑADE
        % 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;
u0c = ulc; % SE AÑADE
u0d = u0d; % SE AÑADE
end %end step iteration

% Convert back from elliptical basis to linear basis:

ulxH = ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*ula + ...
        (-sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ulb;
ulxV = ( sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ula + ...
        ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*ulb;
ulyH = ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*ulc + ... % SE AÑADE modo 02 (k)
        (-sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*uld;
ulyV = ( sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ulc + ... % SE AÑADE modo 02 (k)
        ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*uld;
ulzH = ( cos(psi)*cos(chi) + j*sin(psi)*sin(chi))*ule + ... % SE AÑADE modo 03 (m)
        (-sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ulf;
ulzV = ( sin(psi)*cos(chi) - j*cos(psi)*sin(chi))*ule + ... % SE AÑADE modo 03 (m)
        ( cos(psi)*cos(chi) - j*sin(psi)*sin(chi))*ulf;
else
    error('Invalid method specified: %s\n', method);
end

```

6.5. MainFMF3dist

```

clear all; close all;

% INPUTS
Ao = 1; % Pulse Amplitude
to = 1e-9; % Pulse Width [s]
nt = 2^12; % Number of points
T = 1e-6; % Period [s]
dt = T/nt; % Time Step
t = (1:nt)'+(nt+1)/2)*dt; % Time Vector

Ao2 = 0.8; % Pulse Amplitude

```

```

to2 = 0.8e-9; % Pulse Width [s]

Ao3 = 1.2; % Pulse Amplitude
to3 = 1.2e-9; % Pulse Width [s]

u0xH = Ao*exp(-t.^2/(2*(to^2))); % Modo 1 polarización H (Gaussian Pulse, chirp=0)
u0xV = zeros(size(u0xH)); % Modo 1 polarización V (Vector of zeros)
u0yH = Ao2*exp(-t.^2/(2*(to2^2))); % Modo 2 polarización H
u0yV = zeros(size(u0xH)); % Modo 2 polarización V
u0zH = Ao3*exp(-t.^2/(2*(to3^2))); % Modo 3 polarización H
u0zV = zeros(size(u0xH)); % Modo 3 polarización V

w = wspace(T,nt); % Angular Frequency Vector
f = fftshift(w/(2*pi)); % Frequency

ztotal0 = 0e3; % Distance [m] 0KM
ztotal1 = 10e3; % Distance [m] 10KM
ztotal2 = 50e3; % Distance [m] 50KM
ztotal3 = 200e3; % Distance [m] 200KM

dz = 200; % Propagation stepsize

nz0 = ztotal0/dz; % Number of steps to take 0KM
nz1 = ztotal1/dz; % Number of steps to take 10KM
nz2 = ztotal2/dz; % Number of steps to take 50KM
nz3 = ztotal3/dz; % Number of steps to take 200KM

%%% SSMF parameters %%%
alphadB = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m]
alphaa = log(10)*alphadB/10; % Power loss coefficient in linear

c = 3e8; % Light speed [m/s]
lambda = 1550*1e-9; % Wavelength

D = 17e-6; % Dispersión [s/m^2]
S = 0.092*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_2 = -((D*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_3 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*S-lambda^2*beta_2/(pi*c); % Beta_3
betapa = [0, 0, beta_2, beta_3]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD = 10.4e-6; % Mode field diameter [m]
n2 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff = pi*(MFD/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma = 2*pi*n2/(lambda*Aeff); % Nonlinearity coefficient

%%% FMF parameters %%%
%LP11
alphadB11 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha11 = log(10)*alphadB11/10; % Power loss coefficient in linear

DLP11 = 22e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP11 = 0.064*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_211 = -((DLP11*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_311 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP11-lambda^2*beta_211/(pi*c); % Beta_3
betap11 = [0, 0, beta_211, beta_311]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD11 = 15.2e-6; % Mode field diameter [m]
n211 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff11 = pi*(MFD11/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma11 = 2*pi*n211/(lambda*Aeff11); % Nonlinearity coefficient

%LP01
alphadB01 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha01H = log(10)*alphadB01/10; % Power loss coefficient in linear
alpha01V = log(10)*alphadB01/10; % Power loss coefficient in linear

DLP01 = 21.1e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP01 = 0.066*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_201 = -((DLP01*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_301 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP01-lambda^2*beta_211/(pi*c); % Beta_3
betap01H = [0, 0, beta_201, beta_301]; % Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

```

```

betap01V = [0, 0, beta_201, beta_301];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD01 = 18.2e-6; % Mode field diameter [m]
n201 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff01 = pi*(MFD/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma01 = 2*pi*n201/(lambda*Aeff01); % Nonlinearity coefficient

%LP02
alphadB02 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha02H = log(10)*alphadB02/10; % Power loss coefficient in linear
alpha02V = log(10)*alphadB02/10; % Power loss coefficient in linear

DLP02 = 17.5e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP02 = 0.043*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_202 = -((DLP02*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_302 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP02-lambda^2*beta_202/(pi*c); % Beta_3
betap02H = [0, 0, beta_202, beta_302];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]
betap02V = [0, 0, beta_202, beta_302];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD02 = 15.2e-6; % Mode field diameter [m]
n202 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff02 = pi*(MFD02/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma02 = 2*pi*n202/(lambda*Aeff02); % Nonlinearity coefficient

%LP21
alphadB21 = 0.2e-3; % Power loss coefficient [dB], ie, P=P0*exp(-
alpha*z) [dB/m] ASUMIMOS LA MISMA ATENUACIÓN POR MODO
alpha21H = log(10)*alphadB21/10; % Power loss coefficient in linear
alpha21V = log(10)*alphadB21/10; % Power loss coefficient in linear

DLP21 = 21.4e-6; % Dispersión [s/m^2]
SLP21 = 0.056*10e3; % Slope [s/m^2]
beta_221 = -((DLP02*(lambda^2))/(2*pi*c)); % Beta_2
beta_321 = (((lambda^2)/(2*pi*c))^2)*SLP02-lambda^2*beta_202/(pi*c); % Beta_3
betap21H = [0, 0, beta_221, beta_321];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]
betap21V = [0, 0, beta_221, beta_321];% Dispersion polynomial coefficients, [beta_0 ...
beta_m]

MFD21 = 14.3e-6; % Mode field diameter [m]
n221 = 2.4e-20; % No linear index [m^2/W]
Aeff21 = pi*(MFD21/2)^2; % Effective area [m^2]
gamma21 = 2*pi*n221/(lambda*Aeff21); % Nonlinearity coefficient

alphak1 = alpha11; % Generic alpha value, 1st mode polarization H
alphak2 = alpha11; % Generic alpha value, 1st mode polarization V
alphap1 = alpha11; % Generic alpha value, 2nd mode polarization H
alphap2 = alpha11; % Generic alpha value, 2nd mode polarization V
alpham1 = alpha21H; % Generic alpha value, 3rd mode polarization H
alpham2 = alpha21V; % Generic alpha value, 3rd mode polarization V

betak1 = betap11; % Generic beta value, 1st mode polarization H
betak2 = betap11; % Generic beta value, 1st mode polarization V
betap1 = betap11; % Generic beta value, 2nd mode polarization H
betap2 = betap11; % Generic beta value, 2nd mode polarization V
betam1 = betap21H; % Generic beta value, 3rd mode polarization H
betam2 = betap21V; % Generic beta value, 3rd mode polarization V

gammak = gammal1; % Generic gamma value, 1st mode
gammap = gammal1; % Generic gamma value, 2nd mode
gammam = gamma21; % Generic gamma value, 3rd mode

psp = 0; % Polarization eigenstate (PSP) of fiber
method = 'circular'; % Method to use (default = 'elliptical')
maxiter = 4; % Max number of iterations (default = 4)
tol = 1e-5; % Convergence tolerance (default = 1e-5)

% GAUSSIAN PULSE PROPAGATION IN A SINGLE MODE FIBER WITH SSPROP
tic;
[ulxH0_smf]=ssprop(u0xH, dt, dz, nz0, alphaa, betapa, gamma);
[ulxH1_smf]=ssprop(u0xH, dt, dz, nz1, alphaa, betapa, gamma);

```

```

[ulxH2_smf]=ssprop(u0xH, dt, dz, nz2, alphaa, betapa, gamma);
[ulxH3_smf]=ssprop(u0xH, dt, dz, nz3, alphaa, betapa, gamma);
toc;

% PROPAGATION IN A TWO MODE FIBER (WITH POLARIZATIONS H AND V) WITH SSPROPV
tic;
[ulxH0,ulxV0,ulyH0,ulyV0,ulzH0,ulzV0]=sspropvFMF3(u0xH,u0xV,u0yH,u0yV,u0zH,u0zV,dt,dz,nz
0,alphak1,alphak2,alphap1,alphap2,alpham1,alpham2,betak1,betak2,betap1,betap2,betam1,bet
am2,gammak,gammap,gammam,psp,method,maxiter,tol);
[ulxH1,ulxV1,ulyH1,ulyV1,ulzH1,ulzV1]=sspropvFMF3(u0xH,u0xV,u0yH,u0yV,u0zH,u0zV,dt,dz,nz
1,alphak1,alphak2,alphap1,alphap2,alpham1,alpham2,betak1,betak2,betap1,betap2,betam1,bet
am2,gammak,gammap,gammam,psp,method,maxiter,tol);
[ulxH2,ulxV2,ulyH2,ulyV2,ulzH2,ulzV2]=sspropvFMF3(u0xH,u0xV,u0yH,u0yV,u0zH,u0zV,dt,dz,nz
2,alphak1,alphak2,alphap1,alphap2,alpham1,alpham2,betak1,betak2,betap1,betap2,betam1,bet
am2,gammak,gammap,gammam,psp,method,maxiter,tol);
[ulxH3,ulxV3,ulyH3,ulyV3,ulzH3,ulzV3]=sspropvFMF3(u0xH,u0xV,u0yH,u0yV,u0zH,u0zV,dt,dz,nz
3,alphak1,alphak2,alphap1,alphap2,alpham1,alpham2,betak1,betak2,betap1,betap2,betam1,bet
am2,gammak,gammap,gammam,psp,method,maxiter,tol);
toc;

% POWER AVERAGE VECTOR [dBm] AND DISTANCE VECTOR [km]
pw0_SMF = (20*log10(sum(abs(ulxH0_smf))/length(ulxH0_smf)))+30;
pw1_SMF = (20*log10(sum(abs(ulxH1_smf))/length(ulxH1_smf)))+30;
pw2_SMF = (20*log10(sum(abs(ulxH2_smf))/length(ulxH2_smf)))+30;
pw3_SMF = (20*log10(sum(abs(ulxH3_smf))/length(ulxH3_smf)))+30;

pw0_LP11a = (20*log10(sum(abs(ulxH0))/length(ulxH0)))+30;
pw1_LP11a = (20*log10(sum(abs(ulxH1))/length(ulxH1)))+30;
pw2_LP11a = (20*log10(sum(abs(ulxH2))/length(ulxH2)))+30;
pw3_LP11a = (20*log10(sum(abs(ulxH3))/length(ulxH3)))+30;

pw0_LP11b = (20*log10(sum(abs(ulyH0))/length(ulyH0)))+30;
pw1_LP11b = (20*log10(sum(abs(ulyH1))/length(ulyH1)))+30;
pw2_LP11b = (20*log10(sum(abs(ulyH2))/length(ulyH2)))+30;
pw3_LP11b = (20*log10(sum(abs(ulyH3))/length(ulyH3)))+30;

pw0_LP21 = (20*log10(sum(abs(ulzH0))/length(ulzH0)))+30;
pw1_LP21 = (20*log10(sum(abs(ulzH1))/length(ulzH1)))+30;
pw2_LP21 = (20*log10(sum(abs(ulzH2))/length(ulzH2)))+30;
pw3_LP21 = (20*log10(sum(abs(ulzH3))/length(ulzH3)))+30;

pw_SMF = [pw0_SMF pw1_SMF pw2_SMF pw3_SMF];
pw_LP11a = [pw0_LP11a pw1_LP11a pw2_LP11a pw3_LP11a];
pw_LP11b = [pw0_LP11b pw1_LP11b pw2_LP11b pw3_LP11b];
pw_LP21 = [pw0_LP21 pw1_LP21 pw2_LP21 pw3_LP21];

d = [0 10 50 200];

% GRAPHIC
figure(1);
plot(d, pw_SMF, '-o', d, pw_LP11a, '-x', d, pw_LP11b, '-x', d, pw_LP21, '-^',
'linewidth', 1.2);
xlabel ('Distancia [km]');
ylabel ('Potencia [dBm]');
legend ('SMF','LP11a','LP11b','LP21');
title ('Potencia media en la salida de la fibra para diferentes distancias');
grid on;

```