



**Universidad**  
Zaragoza

## Proyecto Fin de Carrera

# Integración del modelo matricial para fibra óptica de plástico en el software de simulación OptSim

Autor

Pablo Martínez Gómez

Directora

Alicia López Lucia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Junio 2017



### **AGRADECIMIENTOS:**

A todas las mujeres de mi vida sin las cuales esto nunca habría sido posible.

Gracias Mamá, todo lo que soy y seré es gracias a ti, espero que te sientas orgullosa de mí. Siempre estarás conmigo.

Gracias Susana, fuiste el apoyo que me ayudo a empezar este recorrido. Nunca me he vuelto a olvidar de  $\frac{1}{j\omega C}$ .

Gracias Julia, amiga, compañera, y tutora al mismo tiempo. Gracias por darme las herramientas con las que labrar mi camino y por estar ahí cuando nadie estaba.

Gracias Beatriz, por sufrir incluso más que yo, por darme fuerzas para no rendirme y por devolverme la confianza en mí mismo y las ganas de luchar.

Gracias Alicia, por darme el proyecto que necesitaba, el cual he disfrutado como si no fuera un trabajo. Y por todo el esfuerzo y apoyo que me has dado, siempre me acordaré de ello.

Gracias.



# Integración del modelo matricial para fibra óptica de plástico en el software de simulación OptSim

## RESUMEN

La fibra óptica de plástico (*Plastic Optical Fiber*, POF) ha destacado como medio de transmisión en entornos de corto alcance con necesidades moderadas en cuanto a ancho de banda y elevado número de conectores, aplicándose en entornos domésticos, redes de comunicaciones en aviones y sobretodo en el sector de la automoción. Su elevado tamaño le otorga flexibilidad, facilidad de manipulación y simplifica la labor de alineamiento con conectores, fuentes... lo que reduce el coste de los mismos. Sin embargo esto también limita su ancho de banda y su elevada atenuación impide su uso en distancias por encima del centenar de metros, además estas características han dificultado su modelado ocasionando que los software comerciales de simulación óptica no incluyan modelos de POF.

Este proyecto se ha realizado dentro del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) centrándose en su modelo matemático desarrollado en Matlab, que caracteriza las fibras POF y sus componentes mediante matrices y permite describir la propagación de la luz en su interior. OptSim es un entorno de simulación óptica, el cual cuenta por un lado con su plataforma ModeSYS, que le permite trabajar con la información espacial contenida en las señales ópticas que se transmiten por este tipo de fibras, y por otro con la capacidad de co-simulación con el entorno Matlab. Así pues el objetivo del proyecto es la integración de dicho modelo en este entorno con la finalidad de crear una librería con los componentes habituales en enlaces POF, obteniendo de este modo una nueva herramienta que nos permitirá realizar simulaciones de estos enlaces de forma previa a su despliegue físico.

En concreto el desarrollo de este proyecto se ha centrado en la creación de un interfaz definido en Matlab que sea capaz de interpretar el formato interno de la señales de ópticas de OptSim, transformar esta información a las necesidades del modelo matricial y posteriormente devolver de manera adecuada los resultados obtenidos, con el objetivo de establecer un canal de comunicación entre ambos sistemas, de forma que una vez han sido resueltas las dificultades involucradas en este proceso, permita la incorporación de los modelos para diferentes componentes presentes en el grupo GTF. Por último se han realizado una serie de simulaciones que constatan el correcto funcionamiento de los modelos creados.



# Índice de contenidos

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 Objetivo del proyecto .....	1
1.2 Estructura de la memoria .....	2
Capítulo 2: La fibra óptica de plástico (POF).....	4
2.1 Aspectos generales .....	4
2.1.1 Propiedades físicas y de transmisión .....	5
2.1.2 Comparación con otros medios de transmisión guiados.....	8
2.1.3 Tipos de POF .....	9
2.1.4 Ámbitos de aplicación.....	11
2.2 Modelado y simulación de enlaces POF .....	14
2.2.1 Modelo matricial para la propagación de potencia óptica en POF.....	14
2.2.2 Integración del modelo en la simulación .....	16
Capítulo 3: El software de simulación Optsim .....	19
3.1 Aspectos generales .....	19
3.1.1 Modos de simulación.....	20
3.1.2 ModeSYS: tratamiento de información espacial .....	20
3.1.3 CCM: co-simulación con Matlab .....	21
3.2 El modelo <i>Large-Core Step-Index Fiber</i> .....	26
3.2.1 Funcionamiento general .....	26
3.2.2 Aspectos a mejorar .....	29
Capítulo 4: Integración del modelo matricial de POF en OptSim .....	33
4.1 Interfaz OptSim-Matlab: aspectos de compatibilidad .....	33
4.1.1 Salida de la fuente ModeSYS – entrada CCM .....	34
4.1.2 Salida del CCM – entrega señal a OptSim .....	40
4.1.3 Corrección de problemas con pulsos estrechos y tasas de muestreo elevadas .....	41
4.2 Componentes de la librería POF .....	42
4.2.1 Fibra óptica de salto de índice .....	43
4.2.2 Conectores .....	47
4.3 Características del diseño de los bloques y comparación con el modelo <i>Large-Core Step-Index Fiber</i> .....	48
4.3.1 Tiempo de ejecución.....	51
Capítulo 5: Ejemplos de aplicación .....	53

5.1 Respuesta impulsional y frecuencial de un enlace POF.....	53
5.2 Prestaciones de un enlace POF de comunicaciones digitales.....	56
5.3 Evaluación del impacto de la posición de los conectores.....	58
Conclusiones y líneas futuras.....	61
6.1 Conclusiones .....	61
6.2 Posibilidades de continuación y mejora del trabajo.....	61
6.3 Valoración del proyecto.....	62
Bibliografía .....	64
Índice de figuras.....	66
Índice de acrónimos, nomenclatura o glosario.....	68
Anexo I: Diagrama de Gantt.....	71
Anexo II: Formato de ficheros especificados por el usuario.....	72
Anexo III: Archivo DTA .....	74
Anexo IV: Obtención de la distancia a través de la anchura del haz y el radio de curvatura .....	78
Anexo V: Datos de las fibras y conectores integrados.....	79
V.1 Mitsubishi, GH 4001 .....	79
V.2 Mitsubishi, BH4001.....	80
V.3 Agilent, HFBR-RUS100 .....	81
V.4 Toray, PGU-FB1000.....	83
V.5 Conector ST.....	85
V.6 Conector VersaLink.....	86
Anexo VI: Códigos para la integración del modelo .....	87



# Capítulo 1: Introducción

---

Este proyecto fin de carrera se encuentra dentro del marco de investigación en torno a las fibras ópticas de plástico llevado a cabo por parte del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) de la Universidad de Zaragoza. Grupo que mediante la caracterización experimental de diversas fibras, conectores, láseres, etc... consiguió desarrollar un modelo matemático basado en matrices que permite simular la propagación de la luz a través de este tipo de fibras.

## 1.1 Objetivo del proyecto

Desde hace muchos años las fibras ópticas de plástico han estado presentes con el objetivo de ofrecer una solución óptima dentro de los sistemas de comunicaciones de corto alcance, ámbitos como las redes de aviones críticas con el peso, muy ajustadas en potencia y con un elevado número de conectores, la industria del automóvil que requiere anchos de banda decentes junto con una buena capacidad de manipulación o los entornos residencial e industriales que precisan inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas son en los que más relevancia ha alcanzado hasta la actualidad, debido al conjunto de características que ofrece en comparación con otros medios guiados de transmisión. Una de sus características más relevantes es su elevado tamaño de 1 mm de diámetro que unido a estar fabricadas en materiales plásticos les confieren buena flexibilidad y facilidad de manipulación, lo cual, solventa los problemas en este aspecto de la fibra óptica convencional, además pueden aceptar más cantidad de luz y también requieren menor precisión en la conectorización con otros elementos del sistema como fuentes, conectores... por lo que se reduce el coste de los componentes asociados a estas fibras. No obstante esta característica permite que en su interior se propaguen millones de modos en contraste con las fibras ópticas de vidrio en las que se soportan del orden de cientos o incluso solo permiten la propagación del modo fundamental como es el caso de la fibra monomodo. Debido a esto sufren una limitación en su ancho de banda que junto a su elevada atenuación en función de la distancia las establecen como una respuesta especialmente adecuada en distancias cortas y con requisitos de ancho de banda moderados.

No sólo sus características físicas les limitan a entornos específicos, sino que su alta multimodalidad o efectos como el fuerte acoplamiento modal que se produce en su interior ha dificultado su modelado, ocasionando que los principales softwares comerciales de simulación óptica no incluyan modelos para POF, y por ende dificultando la capacidad de obtener aproximaciones o poder realizar estimaciones del rendimiento de los sistemas basados en POF antes de realizar su despliegue físico, lo cual es especialmente crítico ya que en muchos casos las fibras ópticas trabajan cerca de su capacidad máxima de ancho de banda y/o potencia. Es en este punto donde entra el juego el modelo matemático creado por el Grupo de Tecnologías Fotónicas, este modelo denominado modelo matricial consta de un conjunto de códigos y funciones desarrolladas en el lenguaje de ingeniería Matlab que realizan la caracterización de las fibras de plástico junto con sus componentes asociados, a través de matrices que describen la propagación de la luz a través de este tipo de fibras teniendo en cuenta las propiedades temporales y espaciales de la misma. No fue hasta hace poco, en concreto en junio del año 2015 cuando se apreció el interés en fibras ópticas de plástico por parte

del software de simulación óptica OptSim, al introducir en su plataforma un modelo de fibra óptica basado en las publicaciones de modelado POF de la Universidad de Zaragoza. El desarrollo por parte de este software de su plataforma ModeSYS, que incluye la capacidad de trabajar con la información espacial de las señales ópticas, dentro de la cual ya existe una gran variedad de modelos que simulan fuentes, detectores, analizadores y otros componentes, junto con la capacidad de OptSim de co-simulación con el entorno Matlab, forman los dos puntos clave que han motivado el desarrollo de este proyecto de fin de carrera. El objetivo general del mismo es integrar el modelo matricial del grupo GTF en el entorno de simulación óptica OptSim, creando de este modo una librería con los componentes más habituales de los enlaces POF que sirva como herramienta de simulación para el análisis y desarrollo de enlaces de comunicaciones con fibra de plástico, permitiendo obtener prestaciones como la tasa de error en el bit, el diagrama de ojo o la respuesta frecuencial de las diferentes configuraciones de diseño de forma previa a su implementación y como herramienta para el desarrollo de futuros estudios en el entorno académico o de investigación.

Para la consecución de este objetivo el trabajo propuesto en este proyecto ha sido estructurado en las fases de desarrollo mostradas a continuación:

- Documentación sobre las propiedades de la fibra óptica de plástico y sus áreas de aplicación, de manera más específica sobre el modelo POF concebido en el grupo y sobre el entorno software de simulación óptica OptSim.
- Estudio de las posibilidades de la plataforma de simulación de múltiples modos ModeSYS, perteneciente a Optsim, haciendo especial hincapié en la representación espacio-temporal de las señales ópticas.
- Adaptación del modelo POF del grupo GTF a la anterior plataforma e integración en el citado software comercial.
- Generación de una librería específica de fibra de plástico compatible con los modelos multimodo ya existentes.
- Extracción de resultados y conclusiones.

## 1.2 Estructura de la memoria

El contenido de esta memoria está distribuido en los capítulos que se introducen a continuación:

- **Capítulo 1: Introducción**  
En él que se describe el contexto del proyecto, la situación de partida sobre la que se apoya y se especifica su objetivo principal.
- **Capítulo 2: La fibra óptica de plástico**  
Presenta los conceptos fundamentales sobre la fibra óptica de plástico, así como los ámbitos o sectores en los que su introducción ha sido más relevante. También se realiza una explicación a grandes rasgos de cómo se obtuvo el modelo matricial del grupo POF, su motivación y las ventajas que nos aporta con respecto a los modelos de simulación típicos.
- **Capítulo 3: El software de simulación OptSim**  
En el siguiente capítulo, se habla de las principales características de OptSim, sus modos de simulación, la plataforma de tratamiento de información espacial ModeSYS y se detalla el

bloque de co-simulación que nos permitirá integrar el modelo matricial dentro del entorno de simulación.

- **Capítulo 4: Integración del modelo matricial de POF en OptSim**

Este es el capítulo que recoge los conocimientos adquiridos que son necesarios para la integración de cualquier modelo espacio-temporal desarrollado en Matlab al entorno OptSim. En él se detallan los principales aspectos de compatibilidad entre ambas plataformas, así como una descripción completa de los componentes que forman la librería desarrollada para el proyecto. Por último se enumeran las diferentes características que contienen estos componentes y se comparan con las características correspondientes del modelo existente en la versión comercial de OptSim.

- **Capítulo 5: Ejemplos de aplicación**

En el penúltimo capítulo, se evalúan con ejemplos prácticos las prestaciones que se han considerado más relevantes con los modelos creados en la librería, así como situaciones de especial interés y se analizan sus resultados.

- **Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras**

Por último, se abordan las conclusiones del trabajo, los objetivos cumplidos y las posibilidades de continuación. Finalizando con la opinión personal de la experiencia obtenida como resultado de la realización del mismo.

A continuación, se incluyen un conjunto de anexos que complementan el contenido de la memoria, aportando información importante relacionada con el proyecto.

- **Anexo I: Diagrama de Gantt**

Contiene el diagrama temporal de las diferentes fases que han sido necesarias para el desarrollo de este proyecto.

- **Anexo II: Formato de ficheros especificados por el usuario**

Explica cómo debe ser formato tanto para el bloque de fibra de OptSim como para el modelo de fibra de nuestra librería, en el caso de que el usuario desee introducir la información espacial de la señal a través de un archivo externo.

- **Anexo III: Archivos DTA**

Contiene los archivos .dta que especifican el contenido de los bloques CCM que forman los componentes de la librería.

- **Anexo IV: Obtención de la distancia a través de la anchura del haz y el radio de curvatura**

Incluye el desarrollo matemático clave para la obtención de la distancia de simulación de OptSim, la cual es uno de los principales aspectos de compatibilidad entre los entornos propuestos.

- **Anexo V: Datos de las fibras integradas**

En él se exponen las hojas características de las fibras que se integran dentro del componente que modela la fibra óptica de salto de índice, así como los dos tipos de conectores modelados.

- **Anexo V: Código generado para los interfaces**

Para acabar se incluyen los códigos correspondientes a los archivos generados en Matlab que sirven como interfaz entre el bloque CCM y el modelo de componente.

# Capítulo 2: La fibra óptica de plástico (POF)

---

En este capítulo se presentarán algunos de los conceptos clave sobre los que se apoya el trabajo desarrollado en este proyecto fin de carrera. El objetivo del primer apartado es familiarizarnos con la fibra óptica de plástico, para lo cual se detallarán sus cualidades y entornos de uso.

En el segundo apartado se presentará el modelo matricial utilizado para describir la propagación de la luz en enlaces POF y que se ha desarrollado en el Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA).

## 2.1 Aspectos generales

Esta sección nos introducirá en la fibra óptica de plástico, sus características físicas, los tipos que existen, las nociones básicas de su comportamiento y su interacción con las señales ópticas, el porqué de su uso frente a la fibra de vidrio debido a sus ventajas e inconvenientes y los ámbitos en los que la podemos encontrar.

La fibra óptica de plástico (POF) es llamada con frecuencia la fibra óptica del consumidor, debido a su bajo coste y su fácil manipulación en comparación con las fibras ópticas de vidrio. En cuanto a la velocidad que soportan, ésta depende del material con el que estén fabricadas y de su perfil de índice. La fibra POF estándar (salto de índice PMMA con núcleo de 1 mm de diámetro) es capaz de transmitir 1 Gb/s sobre 50 m. En conjunto presentan una capacidad de transmisión moderada de hasta 2.5 Gb/s en enlaces cortos, que a pesar de ser inferior a la de las fibras de vidrio supera la del par de cobre tradicional.

Las POF no son un descubrimiento actual, sino que han sido investigadas desde hace 45 años. Sin embargo debido a su alta atenuación y a la ausencia de aplicaciones comerciales se estancaron durante muchos años. Las POF no recibieron especial interés hasta 1990, año en el que el Profesor Koike de la Universidad Keio (Japón) desarrolló las fibras de plástico de índice gradual, y hasta 1996 en el que se lograron fibras perfluorinadas de baja atenuación. Fue a partir de esos años cuando aparecieron gran cantidad de aplicaciones.

Gracias a sus sucesivas mejoras en transparencia y ancho de banda, las POF se convirtieron en un sustituto ideal para los pares de cobre en escenarios de comunicaciones de corta distancia. Las ventajas que aporta la POF en estos entornos son una mayor capacidad de transmisión, inmunidad a las interferencias y bajo peso, características que las hicieron especialmente adecuadas para aplicaciones industriales o de automoción. Además, gracias a su facilidad de manipulación, flexibilidad y posibilidad de uso de componentes (fuentes y detectores) de bajo coste complementan a los enlaces de fibra de vidrio al llegar a este tipo de entornos.

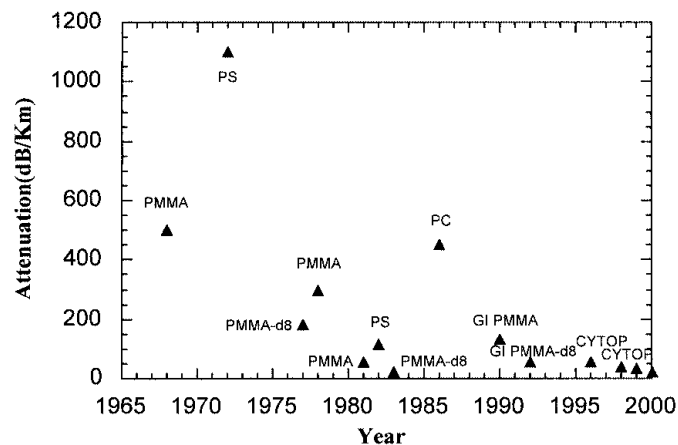


Figura 2-1: Evolución de la atenuación en fibras POF en función del material que forma el núcleo. [5]

### 2.1.1 Propiedades físicas y de transmisión

La fibra óptica de polímero, o más comúnmente llamada fibra óptica de plástico consiste en un polímero altamente transparente, típicamente polimetil-metacrilato (PMMA), que sirve como guía para las señales ópticas. Este polímero forma el núcleo (habitualmente de 1 mm de diámetro) y está rodeado por una fina cubierta con un bajo índice de refracción, comúnmente PMMA fluorinado, que va reflejando totalmente la luz que se encuentra dentro del núcleo, permitiendo guiarla por el interior de la fibra. Por último, las fibras van recubiertas por una cobertura de protección llamada sobrecubierta que le aporta protección. El diámetro final de una fibra estándar es de algo más de 2 mm, extremadamente grande si lo comparamos con los 125  $\mu\text{m}$  de las fibras de vidrio convencionales.

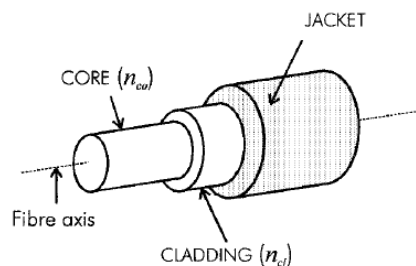


Figura 2-2: Estructura de una POF.

Los dos parámetros más importantes que condicionan la transmisión a través de la fibra de plástico son: la atenuación, que depende del material con el que está fabricado el núcleo y el ancho de banda, que depende de las características geométricas de la fibra, mayoritariamente del perfil de índice, del que hablaremos más adelante.

La **atenuación** depende del material con el que se fabrican las fibras, así como de la madurez del proceso de fabricación. Se pueden clasificar los mecanismos básicos de atenuación en dos grupos, intrínsecos y extrínsecos. Entre las pérdidas intrínsecas tenemos, la absorción del material y la difusión de Rayleigh. Ambas contribuciones están causadas por la absorción de energía en las moléculas debido a las transiciones que se producen entre diferentes niveles energéticos, por lo que estas pérdidas dependen de la composición de la fibra y no pueden ser eliminadas. Por otra parte, las pérdidas extrínsecas, son las que no existen en una fibra ideal. Por lo cual pueden ser evitadas aumentando la calidad del proceso de fabricación, reduciendo burbujas, micro fracturas y demás

imperfecciones estructurales. Las pérdidas por radiación debidas a la geometría de la fibra, como pueden ser por ejemplo, las pérdidas por curvatura, también están incluidas en este grupo.

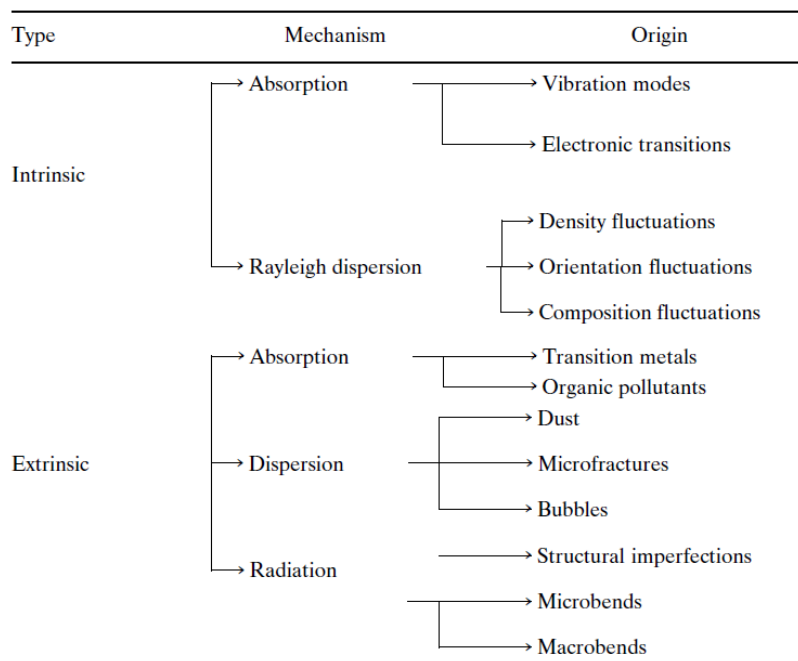


Figura 2-3: Clasificación de los mecanismos de pérdidas que contribuyen a la atenuación de la fibra. [13]

La mayoría de los sistemas de transmisión óptica son digitales, es decir, la información se transmite en forma de pulsos. El pulso a transmitir entra en la fibra óptica, y bajo la teoría de rayos, los rayos emitidos por la fuente son refractados pasando del aire al núcleo en función de la ley de Snell,  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  y del perfil de índice de esa fibra. En este proceso las trayectorias de los rayos y los ángulos varían. Dentro del núcleo, sólo los rayos que se propagan con un ángulo menor que el ángulo crítico son guiados. La diferencia temporal, originada por la diferencia de caminos ópticos recorridos por el conjunto de rayos guiados que se produce en su recorrido a través de la fibra, provoca un ensanchamiento en los pulsos de luz. Este esparcimiento temporal que experimenta el pulso, es conocido como dispersión, fenómeno que determina el máximo ancho de banda que puede ser transmitido a través de la fibra.

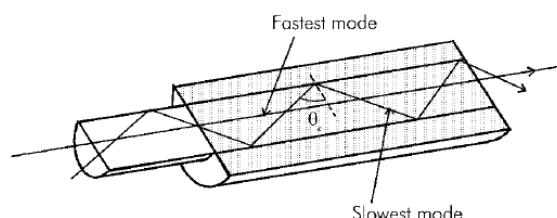


Figura 2-4: Trayectorias del rayo más lento y más rápido en una SI-POF. [5]

Son varios los factores que contribuyen a la aparición de la **dispersión** al propagarse la luz a través de la fibra: la dispersión modal o intermodal, la dispersión material y la dispersión por guía de ondas, aunque estas dos últimas suelen ser agrupadas en la dispersión intramodal o cromática. La dispersión material es debida a que el índice de refracción de la fibra varía en función de la longitud

de onda, por lo que los diferentes componentes espectrales del pulso viajan a diferentes velocidades.

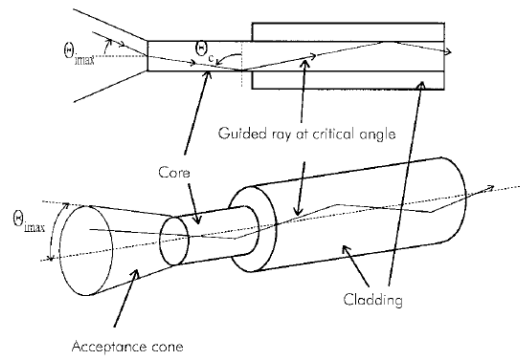


Figura 2-5: Definición de la apertura numérica en una SI-POF [5].

La **dispersión modal**, en cambio, es debida a la existencia de varios modos guiados por la fibra o rayos (de acuerdo a la teoría de rayos). Así, en fibras de vidrio monomodo, este factor no contribuye a la dispersión total introducida por la fibra, mientras que en fibras de vidrio multimodo o en fibras POF, este es un factor a tener en cuenta. De hecho, la dispersión modal es predominante frente a la cromática en POF.

La magnitud de dispersión modal depende de la capacidad de la fibra para capturar la luz proveniente de una fuente. Esta capacidad depende de los índices de refracción del núcleo y la cubierta ( $n_{co}$  y  $n_{cl}$ ) que determinan el ángulo de apertura del cono de admisión ( $\theta_{imax}$ ), es decir, el cono que contiene todos los posibles rayos en el aire, que serán guiados al introducirse en el interior de la fibra. El seno de este ángulo de apertura es llamado apertura numérica:

$$AN = \sin \theta_{imax} = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2-1)$$

La apertura numérica es un parámetro muy importante para las fibras ópticas, puesto que indica su capacidad para aceptar y guiar la luz. Cuanto mayor sea la apertura numérica, más luz puede aceptar la fibra, y más fácil resulta el acoplamiento de la luz desde el exterior. No debemos olvidar que los emisores y receptores tienen su propia AN, y que es muy importante un correcto acoplamiento entre la fibra y la fuente para que la transmisión de potencia sea eficiente evitando las pérdidas de acoplo. La AN de una POF es muy grande en comparación a las fibras de vidrio, aproximadamente 0.5. Por otro lado, también existen fibras de plástico con una AN reducida, las cuales son usadas en transmisiones de alta velocidad. Cuanto menor es la AN más alto es el ancho de banda, ya que la dispersión modal decrece, debido a que por la fibra se propagan una menor cantidad de rayos o modos.

Se ha comprobado que en fibras reales, la dispersión modal es menor que la calculada según la teoría de rayos convencional. Esto es provocado por otro de los fenómenos característicos de las POF: la transferencia de potencia entre modos debido a las irregularidades y no homogeneidades existentes en la fibra. Este **acoplo modal o difusión** provoca en general pérdida de potencia y mejora del ancho de banda. Este efecto ha sido modelado con técnicas como el rastreo de rayos o con ecuaciones diferenciales de flujo de potencia [ref]. Así, la distribución modal de la luz que se propaga a través de una fibra POF se halla en continua evolución debido al acoplo entre modos. Existe una longitud a la que la transferencia de potencia entre modos ya no introduce cambios en la distribución, la cual es llamada longitud de equilibrio. La distribución modal a esa distancia, es

conocida como la distribución de equilibrio modal (*Equilibrium Mode Distribution*, EMD). Una peculiaridad de las POF es que como se usan en distancias cortas, en muchas ocasiones no se encuentran en equilibrio modal. Esto contrasta con las fibras de vidrio, para las cuales siempre se trabaja en equilibrio modal. Por ello, y como se explicará en la Sección 2.2, en el modelado de las fibras ópticas de plástico es crucial considerar además del efecto sobre las características temporales de las señales que se propagan, la influencia sobre sus características espaciales o distribución modal.

### 2.1.2 Comparación con otros medios de transmisión guiados

Después de familiarizarnos con las principales propiedades de la fibra de plástico. En este apartado presentaremos las ventajas e inconvenientes de la POF frente a otros medios de transmisión guiados, como las fibras de vidrio o los cables de cobre.

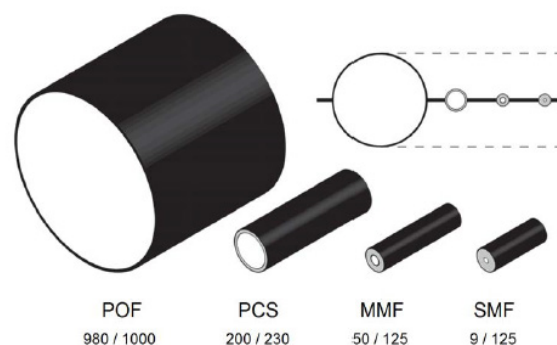


Figura 2-6: Comparación de tamaño de diferentes fibras ópticas típicas y POF.

En cuanto a las más extendidas **fibras ópticas de vidrio**, podemos clasificarlas en dos grandes grupos: fibras multimodo y fibras monomodo. Las fibras multimodo (MMF), que soportan cientos de modos, tienen un diámetro entre  $50 - 62.5 \mu\text{m}$  y son usadas en enlaces que requieren Gigabit Ethernet como los entornos LAN. Por su parte, las fibras monomodo (SMF), sólo soportan la propagación del modo fundamental, tienen un diámetro entre  $5 - 10 \mu\text{m}$  y una AN de  $0.12 - 0.14$ , y se usan en redes de distribución de largo recorrido. Durante muchos años los estudios en comunicaciones ópticas se han centrado en conseguir altas velocidades a largas distancias y otros aspectos como la complejidad o el coste eran simplemente aceptados, por eso, la fibra de vidrio se ha convertido en la columna vertebral en la que se apoyan las redes de comunicaciones de larga distancia y alto rendimiento. Además su gran apertura numérica combinada con su elevado diámetro produce una elevada dispersión modal que limita su ancho de banda. En cambio, la fibra monomodo no tiene rival en el producto ancho de banda-distancia, llegando a decenas de GHz x km, además presenta ventanas de transmisión en el rango de los infrarrojos más anchas que las de la POF, siendo su atenuación en las mismas tres órdenes de magnitud inferior. Sin embargo tienen algunos inconvenientes como su fragilidad y los altos costes de instalación, debidos a la alta precisión requerida en conectores ópticos, empalmes, fuentes y detectores y al coste de estos, ya que son componentes muy sofisticados.

Las **fibras de cubierta de polímero** (*PolymerCladSilica*, PCS), representan una solución híbrida entre las fibras de vidrio y las POF. Están formadas por un núcleo de sílice y una cubierta de polímero, poseen una AN que ronda  $0.3 - 0.4$  y son una buena opción para enlaces cortos. La cubierta de polímero de las fibras PCS afecta de manera positiva a su capacidad para tolerar el stress, y a



parámetros como la atenuación o el rango térmico. Las fibras PCS poseen una atenuación dentro del rango de las fibras de vidrio ( $1 - 2 \text{ dB/km}$ ) y un producto ancho de banda-distancia de  $5 - 10 \text{ MHz} \times \text{km}$ , por lo que son adecuadas para longitudes de hasta 200 metros. Son una buena solución para el sector de automoción porque comparadas con las POF, poseen un ancho de banda ligeramente mayor y mejores características de atenuación, además su rango de temperatura es mayor. Sin embargo, las POF mantienen algunas ventajas como la manejabilidad, coste de instalación y uso de componentes de bajo coste. Además las portadoras usadas en PCS, al estar situadas en el rango de los infrarrojos, necesitan más potencia y pierden las ventajas asociadas a la luz visible de la POF, como la protección del ojo humano en caso de contacto directo con la luz o la comprobación del enlace mediante un simple testeo visual.

A parte de las fibras de vidrio, existen otros medios de comunicación que compiten con la fibra óptica de plástico, como por ejemplo, el cable de cobre o las redes inalámbricas. Aunque el uso del cobre como medio de comunicaciones hace mucho que está técnicamente anticuado, ha sido el estándar de comunicaciones en enlaces cortos prácticamente hasta la actualidad. Como hemos adelantado al comenzar el Capítulo 2.1, las POF se ha convertido en su sustituto ideal debido a muchos factores, siendo los de mayor relevancia, la disminución de peso, el aumento de ancho de banda y la inmunidad a cualquier tipo de interferencia electromagnética. Por otro lado, las comunicaciones inalámbricas han experimentado un espectacular crecimiento en los últimos años, debido a su gran comodidad y al incremento de dispositivos portátiles que llevamos encima, sin embargo, la absorción de las paredes reduce de manera drástica su distancia efectiva, sus campos electromagnéticos son perturbados cada vez más por una enorme variedad de dispositivos electrónicos y no ofrecen prácticamente protección contra espionaje por parte de terceros, lo cual la hace una tecnología inadecuada para transmisiones seguras o información empresarial sensible.

En resumen, las POF son especialmente adecuadas para comunicaciones de corto alcance con requisitos de ancho de banda moderados y un número elevado de conectores, lo que ocurre en coches, trenes, edificios o redes de área local. Al ser más fáciles de instalar no resulta extraño que los sectores en los que más se han aplicado sean: automoción, aviónica y área residencial.

### 2.1.3 Tipos de POF

La fibra óptica de plástico más común y usada es la de salto de índice fabricada en PMMA y con núcleo de 1 mm de diámetro, su apertura numérica típica es de 0.5, y posee una atenuación en el rango de  $0.11 - 0.25 \text{ dB/m}$  en 650 nm. El ancho de banda limitado por la dispersión modal que ofrece es de  $40 \text{ MHz} \times 100 \text{ m}$ . Si usamos una fibra con un perfil de índice gradual (GI-POF) el producto ancho de banda-distancia obtiene una mejora cien veces superior.

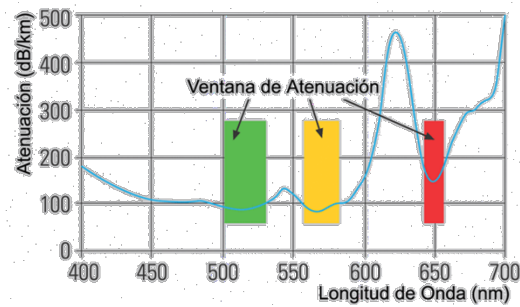


Figura 2-7: Atenuación de fibras PMMA.

Como hemos dicho previamente, las POF se clasifican en función del material con el que están fabricadas, el cual determina su atenuación, y de sus características geométricas, principalmente el perfil de índice que determina el ancho de banda de transmisión.

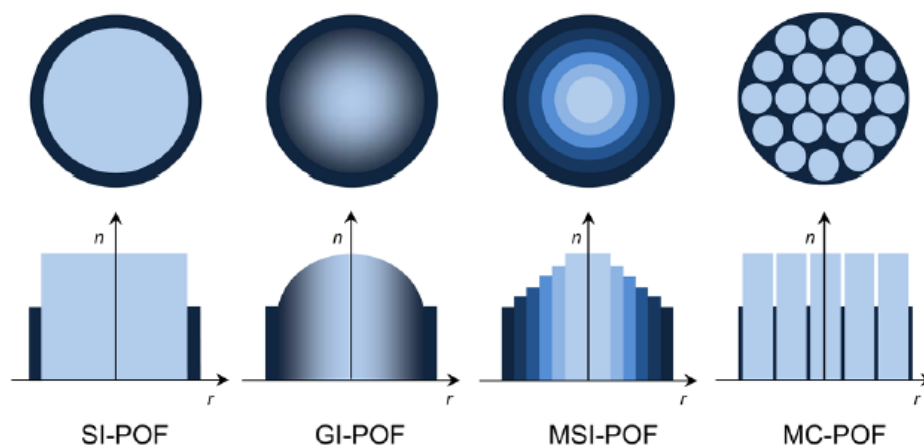


Figura 2-8: Clasificación de POF en función de su perfil de índice. Salto de índice, índice gradual, índice multisalto, multinúcleo.

A lo largo del tiempo, la investigación en la fabricación de POF ha pasado por usar materiales con mejores características, así como perfiles de índice más complejos, junto con diámetros más pequeños, para obtener un mejor rendimiento en atenuación y ancho de banda. No obstante, estas mejoras han ido acompañadas de un incremento en la complejidad de los procesos y el coste de la fibra y en una disminución de la potencia óptica que se puede introducir en ella. Así, además de los ampliamente conocidos perfiles de salto de índice e índice gradual, se han fabricado fibras como la POF de doble salto de índice (DSI-POF) o la de multisalto (MSI-POF), que reducen la AN a costa de atenuar la potencia en los ángulos más elevados y que presentan un compromiso entre la simplicidad y bajo coste de una SI-POF y el alto ancho de banda de una GI-POF.

En el mercado de POF también existen las POF perfluorinadas (PF GI-POF), con un núcleo de 120  $\mu\text{m}$  que consiguen un incremento muy elevado del ancho de banda perdiendo en gran parte las ventajas de la POF frente a la fibra de vidrio. Dentro de las mismas, cabe destacar las fabricadas en un material llamado CYTOP [ref]. Estas fibras poseen la menor atenuación conseguida en una POF, siendo esta inferior a 0.02 dB/m y con una ventana de transmisión más ancha. Debido a esto su producto ancho de banda-distancia ha llegado hasta la cifra de 2 GHz x 100 m.

Para terminar, aunque manteniendo el objetivo de incrementar el ancho de banda, las fibras multinúcleo (MC-POF), también se centran en mantener las ventajas de un diámetro de núcleo

elevado, facilitando así la inyección de luz en ellas o el alineamiento con conectores. Dividir un único núcleo en un elevado número de guías de luz, permite mejorar las pérdidas por curvatura manteniendo la AN y el ancho de banda de las SI-POF. Además, una de las futuras aplicaciones de las MC-POF es la introducción de la técnica de multiplexación por división en el espacio, que podría elevar el ancho de banda a los niveles de las fibras de vidrio.

### 2.1.4 Ámbitos de aplicación

Son muchos los estudios que se han realizado sobre POF, aspectos como las variaciones en la atenuación debido a curvaturas, resistencia a la tracción o al estrés generado por torsión son algunos de ellos [14-18]. A diferencia de las fibras de vidrio, las POF están hechas de materiales plásticos, por lo que fibras de un 1 mm de diámetro son suficientemente flexibles para las típicas instalaciones de fibra. El radio mínimo de curvatura, es inferior al de las fibras ópticas de vidrio, ya que el plástico es mucho menos rígido que la sílice. Ha sido comprobado que al alargar una POF un 10% de su longitud, la variación en atenuación es menor a 0.1 dB [16], y al enrollarla 100 vueltas con un radio de 50 mm se obtienen variaciones de atenuación menores a 0.15 dB [14]. Estos estudios demuestran que es posible introducir pequeñas curvaturas en las instalaciones de POF sin sufrir penalizaciones en atenuación o rupturas mecánicas. Además, dado que el material base de las POF es polímero, se pueden alcanzar temperaturas de trabajo de hasta 80 – 100°C, en caso de superar este valor las fibras empezarían a perder su rigidez y transparencia, aunque existen sobrecubiertas que permiten extender la temperatura hasta 125 o 135°C [19]. Así, por ejemplo, en aplicaciones que necesitan un alto ancho de banda, la alta estabilidad termal de una GI-POF ha permitido trabajar sin distorsiones a 85°C incluso después de 1000 horas [20]. Hay que tener en cuenta que la resistencia de las POF a las altas temperaturas depende de la humedad, por ejemplo, si a una temperatura de 85°C producimos un incremento del 85 al 90% de humedad, la atenuación sube más de 0.03 dB/m. No obstante, en ambientes de trabajo húmedos podemos acudir a las fibras perfluorinadas, ya que no absorben el agua por lo que no se ven afectadas por este problema [21]. Por todo esto, las POF son especialmente adecuadas para enlaces de telecomunicaciones cortos y sensores, su éxito se basa principalmente en su facilidad de uso y su bajo coste.

Uno de los principales ámbitos de aplicación de las POFs ha sido y sigue siendo en el campo de los **sensores** [ref]. Su fácil manejo y precio, flexibilidad, y pequeño tamaño posibilita una gran sensibilidad sin ocupar un gran volumen. Se ha comprobado que pueden detectar una asombrosa variedad de parámetros como temperatura, posición, forma, color, brillo, opacidad, densidad, humedad, presión, presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos, velocidad del viento o índice de refracción. Y por si fuera poco estos sensores pueden ser leídos desde posiciones remotas y suprimen el riesgo de descargas eléctricas en entornos explosivos.

Por otra parte, en el ámbito de las comunicaciones ópticas, uno de los sectores en los que más ha penetrado la fibra óptica de plástico ha sido el **sector del automóvil**, ámbito en el cual las fibras están en contacto con los líquidos usados en el mismo. Las POF son capaces de resistir aceite y líquido de batería durante largos periodos de tiempo [22], y gracias a su sobrecubierta de polietileno las PMMA POF quedan protegidas contra una gran variedad de sustancias como el agua, NaOH, ácido sulfúrico [23]. La introducción de las POF en el sector de la automoción ha representado el mayor éxito para esta fibra. En 1998 se creó el estándar Sistema de Transporte Orientado a Multimedia (MOST), y desde que BMW lo introdujo por primera vez en su serie 7 en el año 2001, la

fibra óptica de plástico desplazó al cobre en los enlaces diseñados para aplicaciones multimedia. Desde entonces MOST es la tecnología más usada por los mayores fabricantes del mundo como Toyota, Mercedes, Ford, Hyundai, Jaguar y LandRover. Los beneficios por los que prefieren esta tecnología son principalmente el mayor ancho de banda, la facilidad de manipulación e instalación, el incremento de seguridad en la transmisión, la disminución de peso y la inmunidad a EMI. Estas cualidades también han provocado el desarrollo de aplicaciones de seguridad o protocolos que soporten el rápido crecimiento de sensores, actuadores y unidades de control electrónicas dentro de los coches, por ejemplo, el ByteFlight de BMW, sistema que se centra en asegurarse de que ningún dato se pierda.

	Electromagnetic immunity	Bandwidth	Simple installation	Cost reduction	Flexibility	Weight	Galvanic separation	Mechanic stability	Spark hazard	Required space
Automotive	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Home Networks	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Industry	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aircrafts	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Train	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Figura 2-6: Interés de las ventajas de POF para cada sector. [6]

Desde hace años, la Radio Aeronáutica INC. (ARINC), organización compuesta por las mayores aerolíneas del mundo, ha intentado crear estándares para la fibra de vidrio [ref?]. A pesar de sus esfuerzos, las redes de fibra de vidrio tienen un coste demasiado elevado para reemplazar todas las redes de cobre, y sólo una pequeña parte de la flota necesita enlaces de una velocidad tan alta que compense el coste de los componentes asociados a la fibra de vidrio.

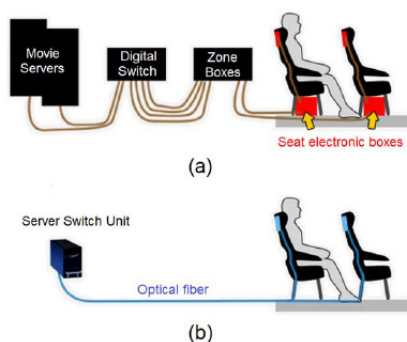


Figura 2-7: Soluciones en aviones: (a) Solución de cobre tradicional, (b) Solución emergente de fibra óptica.

Por otro lado, la facilidad de instalación y mantenimiento junto con el bajo coste, ha despertado el interés por las fibras de polímero. Es el caso del Centro Aeroespacial de Alemania (DLR) que estudia su uso en vuelos civiles o la compañía Boeing en Estados Unidos [refs]. En la actualidad, sólo la POF cumple los requerimientos técnico-económicos para reemplazar todos los enlaces basados en cobre. En contraste con las fibras de silicio, su largo diámetro y alta AN permiten disminuirla pérdida

de potencia debido a los desalineamientos en los conectores, esto es especialmente importante en las redes en aviones. Debido al proceso de fabricación de los mismos, en distintas secciones que posteriormente se ensamblan, los enlaces de comunicaciones en el interior están compuestos por múltiples tramos unidos a través de conectores, por lo que se alcanzan decenas de nodos en los que la reducción de las pérdidas por desalineamiento resulta vital ya que la potencia disponible está limitada. Además con el objetivo de construir aviones de menor peso, todos los grandes fabricantes usan fibras de carbono para el cuerpo del avión, pero eso ha provocado una caída de la resistencia frente a voltajes electromagnéticos y radiación espacial, es aquí especialmente, donde POF ofrece una doble respuesta con su bajo peso e inmunidad al EMI.

Sin embargo, en **aviónica** es vital asegurar el correcto funcionamiento de todos sus dispositivos de manera muy fiable. El entorno hostil de un avión ha provocado que entre los test introducidos en este sector encontremos: temperaturas extremas, de -60 a 130 °C, estabilidad en los conectores en caso de vibraciones, necesidad de impermeabilidad, exigente ancho de banda para propósitos multimedia, resistencia a la deformación y a micro curvaturas provocadas por el estrés o a sustancias contaminantes entre otros, lo que provocado el retraso en el despliegue de fibras plásticas.

El último sector más destacable es el **área doméstica**. Hoy en día, en los hogares reina el servicio Cuádruple Play: banda ancha, televisión, telefonía fija y móvil. El creciente interés en Fibra Hasta el Hogar (FTTH) y el rápido crecimiento de la electrónica de consumo digital, nos exige redes de alta velocidad que puedan gestionar la gran heterogeneidad de señales de este entorno, capaces de conectar varios dispositivos como ordenadores, SmartTVs, Tablets... cada uno con diferentes medios físicos dedicados, como cables Ethernet, coaxiales, HDMI y conectividad inalámbrica. Entre las tecnologías que sirven como solución en este escenario, las fibras de vidrio poseen el mayor producto ancho de banda-distancia, pero son caras, en especial, por culpa de su conectorización, soportan bajos radios de curvatura, y su pequeño diámetro les hace muy vulnerables a la polución. Los cables coaxiales para una distancia de 30 metros y con radios de curvatura grandes tienen mucho más ancho de banda que las POF, sin embargo el aislamiento eléctrico de la red de 230 V es muy crítico. La distribución a través de la línea eléctrica, tiene un rango muy limitado y depende de la misma, es cierto que posee un bajo coste, pero la alta radiación electromagnética y la distribución descontrolada sobre la red son sus mayores desventajas. La conectividad inalámbrica es la más flexible y conveniente para los usuarios. Sin embargo, la absorción de las paredes hace que su distancia efectiva sea muy pobre, y debido a la alta capacidad y calidad del servicio que se exige, no podemos lograr la cobertura de la red mediante enlaces inalámbricos. Además la transmisión no es segura con respecto a terceras personas y las interferencias reducen el ancho de banda significativamente.

Por otro lado, POF es una solución efectiva para proveer conectividad Gigabit en las redes de área doméstica (*Home Area Network*, HAN), ofrece un ancho de banda decente, pequeño tamaño, puede lidiar con pequeños radios de curvatura, al igual que la fibra de vidrio tiene aislamiento eléctrico y baja sensibilidad al EMI y además posee tolerancia a la polución y la ventaja de usar luz visible. Aunque todas estas características le hacen adecuada para transportar los diferentes servicios de las HAN en una única red y distribuir esa heterogeneidad a todos los dispositivos, es su buena compensación entre rendimiento y facilidad de implementación lo que le está otorgando la ventaja en entornos HAN.

Technique	Data rate	Range	Security	Costs	Handling	Deployability	Total
Twisted-Pair cable	+	0	0	++	-	0	2+
Coax cable	0	0	0	+	0	0	1+
Glass fiber	++	++	++	--	--	-	1+
POF	0	-	++	+	+	+	4+
WLAN	--	-	--	++	++	++	1+
Powerline	-	-	--	+	+	++	0

Figura 2-8: Comparación de tecnologías de comunicación para entorno doméstico [4]

A pesar de todo, el futuro de la POF en los hogares aún es incierto. Aunque ya es ampliamente usado en otros países, principalmente en Asia, en Europa su penetración se ha visto ralentizada debido al estado inmaduro del mercado y la falta de estandarización y de componentes comerciales de comunicaciones de banda ancha.

## 2.2 Modelado y simulación de enlaces POF

En la mayoría de los casos, los sistemas de comunicación basados en POF tienen que trabajar muy cerca del límite de su capacidad, que está limitado por su ancho de banda o su balance de potencia, o una combinación de ambos. Por ello, la simulación del sistema para obtener una estimación de su rendimiento antes del despliegue físico es de vital importancia para evaluar la viabilidad de un diseño. No obstante, los entornos de simulación comerciales para enlaces ópticos, no incluyen modelos para las POF, debido a las características especiales que hay que evaluar para su modelado, como por ejemplo, el elevado número de modos que se transmiten en su interior o el fuerte acoplamiento que existe entre ellos.

### 2.2.1 Modelo matricial para la propagación de potencia óptica en POF

En este apartado vamos a presentar el modelo matemático desarrollado por el grupo de fibra óptica de plástico perteneciente al Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) de la Universidad de Zaragoza. De acuerdo a este modelo, denominado modelo matricial, las secciones de fibra y los componentes activos o pasivos son caracterizados mediante matrices que contienen tanto información espacial como temporal. La transformación de la distribución espacio-temporal de la potencia óptica a lo largo de un enlace POF se modela entonces mediante productos matriciales a medida que la luz se propaga por sus distintos componentes. De esta forma, podemos observar la evolución de la señal a lo largo de la red diseñada, lo cual nos da la capacidad para identificar las subredes o componentes críticos de la red objeto de análisis.

El modelo matricial de POF en el que se centra este trabajo está basado en la resolución en el dominio de la frecuencia de la ecuación de flujo de potencia de Gloge [refOPEX09]. Debido a la alta multimodalidad de las fibras de plástico, es frecuente recurrir a la misma para describir la distribución modal de potencia óptica de los pulsos que son transmitidos a través de la fibra [refGloge]. Esta ecuación caracteriza los diferentes modos por sus ángulos de propagación ( $\theta$ ) respecto al eje de propagación de la luz ( $z$ ) y por el tiempo ( $t$ ). Dado que por una POF se pueden propagar millones de modos, se puede considerar al ángulo de propagación  $\theta$  como una variable continua.

$$\frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial z} + \frac{\partial t}{\partial z} \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial t} = -\alpha(\theta)P(\theta, z, t) + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \theta \cdot d(\theta) \cdot \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial \theta} \right), \quad (2-2)$$

donde  $P(\theta, z, t)$  es distribución de potencia óptica y  $\alpha(\theta)$ ,  $d(\theta)$  son funciones del ángulo de propagación que describen los fenómenos de difusión y atenuación, respectivamente. Después de aplicar el método de diferencias finitas a (2-2), se encontró una solución en el dominio frecuencial, que fue reescrita en forma matricial, en la cual, considerando una distribución de potencia angular para cada frecuencia en una longitud dada  $\mathbf{p}(z_1, \omega)$ , se puede obtener la distribución a una longitud superior  $\mathbf{p}(z_2, \omega)$ , según la siguiente expresión:

$$\mathbf{p}(z_2, \omega) = \mathbf{M}(\omega)^{(z_2 - z_1)/\Delta z} \cdot \mathbf{p}(z_1, \omega) \quad (2-3)$$

En esta aproximación  $\mathbf{p}(z_i, \omega)$ , es un vector formado por la distribución angular de potencia discretizada ( $\Delta\theta$ ), para cada frecuencia ( $\omega$ ), y longitud de fibra ( $z_i$ ), siendo  $\Delta z$  el paso de diferencias finitas. Los productos con la matriz de propagación  $\mathbf{M}(\omega)$ , representan los cambios en la distribución angular de potencia en cada incremento de distancia ( $\Delta z$ ).

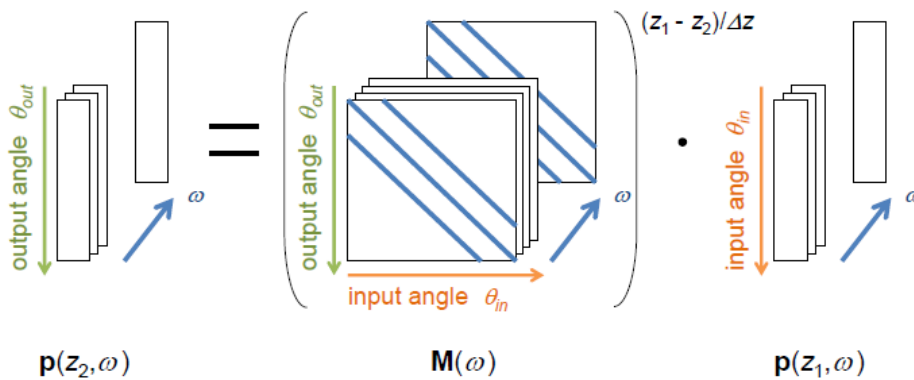


Figura 2-9: Cálculo de una distribución angular de potencia a una distancia  $z_2$  a partir de una distribución de potencia conocida a una distancia  $z_1$  usando la matriz de propagación.

La Figura 2-12 representa gráficamente el producto matricial expresado en (2-3) que permite obtener la evolución de la potencia óptica al propagarse la luz por la fibra en función del ángulo (dimensión espacial) y la frecuencia (dimensión temporal). La matriz de propagación  $\mathbf{M}(\omega)$  depende de las funciones angulares de atenuación  $\alpha(\theta)$  y difusión  $d(\theta)$ , características para cada tipo de fibra.

Así, de acuerdo al modelo matricial cada fibra está caracterizada por una matriz de propagación  $\mathbf{M}(\omega)$  que se puede obtener a partir de sus funciones de atenuación y difusión, las cuales fueron estimadas a partir de medidas de campo lejano (*Far Field Pattern*, FFP). La forma del patrón de campo lejano de una POF, está determinada por la distribución de potencia a la salida de la fibra y esta a su vez depende de la distribución inicial, las propiedades de la fibra y la longitud de esta. Estas propiedades, incluyen los defectos intrínsecos de la fibra, factores externos como curvaturas y también el acoplamiento entre modos y la atenuación ángulo-dependiente, ambas características están determinadas por las propiedades del material, es decir por su difusión y absorción características. Por ello, con el objetivo de poder modelar las POF más extendidas, se capturaron imágenes FFP para varias PMMA SI-POF con alta AN en función de la longitud de fibra. La longitud máxima para cada fibra se escogió de forma que la distribución de equilibrio modal hubiese sido alcanzada. A través de las medidas se estimaron las funciones de atenuación y difusión. Posteriormente se comprobó que las estimaciones de las funciones  $\alpha(\theta)$  y  $d(\theta)$  junto con la solución de diferencias finitas de la ecuación de Gloge fueron capaces de reproducir los FFP medidos [ref].

Además de fibras, el modelo matricial se puede aplicar a otros componentes pasivos como por ejemplo conectores, que fueron caracterizados mediante una matriz característica (**C**) [ref]. En este caso solo se producen alteraciones en el dominio angular por lo que la matriz característica no tiene dependencia con la frecuencia.

$$\mathbf{p}_{out}(\omega) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{p}_{in}(\omega) \quad (2-4)$$

De nuevo, el efecto introducido por el conector sobre la distribución modal de la señal óptica que lo atraviesa se modelo mediante un producto matricial. Este mismo enfoque puede ser aplicado también a otros componentes presentes en enlaces POF, como por ejemplo curvaturas [ref].

### 2.2.2 Integración del modelo en la simulación

El objetivo final del modelado de las fibras ópticas de plástico es permitir obtener mediante simulación el comportamiento de un enlace POF de forma previa a su despliegue. Sin embargo, dada la ausencia de modelos de POF en los softwares comerciales de simulación de sistemas ópticos y la dificultad de la integración del modelo matricial, la metodología de simulación que el grupo ha aplicado habitualmente se realiza en dos pasos. Según esta estrategia, el primer paso consiste en el cálculo de la respuesta frecuencial equivalente del enlace; mientras que posteriormente en un segundo paso dicha respuesta frecuencial es introducida en un software de simulación a nivel de sistema [ref].

La respuesta frecuencial equivalente global se puede obtener a partir de la distribución angular de potencia a la salida del enlace, realizando la integral de la misma sobre la dimensión espacial [8]:

$$H(\omega) = \int_0^{\pi/2} p_{out}(\theta, \omega) \sin(\theta) d\theta \quad (2-5)$$

Por otra parte, y como ya se ha descrito, la distribución de potencia angular a la salida del enlace  $p_{out}(\theta, \omega)$  se puede calcular a partir de la distribución espacial de la fuente  $\mathbf{p}_{source}$  y de las matrices características asociadas a los componentes del enlace diseñado. Por ejemplo, para un enlace compuesto por fuente óptica, detector y un conjunto de secciones de fibra de distintas longitudes unidas mediante conectores, la distribución de potencia óptica a la salida sería:

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{M}_{L_k}(\omega) \cdot \mathbf{C} \cdots \mathbf{M}_{L_2}(\omega) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{M}_{L_1}(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source} = \mathbf{L}(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source} = \mathbf{p}_{out}(\omega), \quad (2-6)$$

donde **D** es la matriz del detector,  $\mathbf{M}_{L_i}$  la matriz de cada segmento de fibra de longitud  $L_i$  y **C** la matriz característica de los conectores. Todas estas matrices se puede agrupar en una única matriz **L**( $\omega$ ) que caracterizaría todos los componentes del enlace salvo la distribución espacial de la fuente.

El segundo paso del método, consiste en introducir el enlace diseñado en un entorno de simulación como una caja negra, caracterizada por su respuesta frecuencial, y de este modo poder calcular parámetros como la tasa de error en el bit (BER) o el diagrama de ojo.

Sin embargo, esta forma de afrontar la simulación de enlaces POF, aunque funcional, resulta poco flexible y transparente. De forma ideal, se debería poder acceder a las características espaciales y temporales de la señal en cualquier punto del enlace de forma que fuera posible evaluar componentes críticos. Así, recientemente se propuso una mejora sobre la forma de simular enlaces con el modelo matricial [ref]. Según esta mejora, la distribución de entrada introducida al enlace,  $\mathbf{p}_{source}$  en (2-6), contendría además de las características espaciales de emisión de la fuente, las



características temporales (frecuenciales) de la señal a transmitir por el enlace POF. De esta forma, si consideramos como distribución de entrada la matriz  $\mathbf{p}_{source,s}(\omega)$  definida como

$$\mathbf{p}_{source,s}(\omega) = S(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source} \quad (2-7)$$

donde  $S(\omega)$  es la transformada de Fourier de la señal a transmitir,  $s(t)$ . Si propagamos dicha distribución espacio-temporal de potencia óptica a través de los componentes del enlace, a la salida tendremos la distribución

$$\mathbf{p}_{out,s}(\omega) = \mathbf{L}(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source,s}(\omega) \quad (2-8)$$

De forma que para obtener la señal en el dominio del tiempo a la salida del enlace,  $r(t)$ , y poder evaluar la tasa de error o explorar el diagrama de ojo sólo es necesario realizar la integración a lo largo de la variable angular y la transformada de Fourier inversa:

$$r(t) = TF^{-1} \left( \int_0^{\pi/2} p_{out,s}(\theta, \omega) \sin(\theta) d\theta \right) \quad (2-9)$$

Lo que es equivalente al cálculo de la transformada inversa de Fourier de la señal a la salida de un bloque tipo caja negra con respuesta frecuencial la del enlace de fibra:

$$r(t) = TF^{-1} (S(\omega) \cdot H(\omega)) = TF^{-1} \left( S(\omega) \int_0^{\pi/2} p_{out}(\theta, \omega) \sin(\theta) d\theta \right) \quad (2-10)$$

A diferencia de la metodología de dos pasos, según este nuevo enfoque, la información que se intercambia entre los bloques de un esquemático que representa a un enlace POF es la distribución espacio-temporal de potencia  $p_{z,s}(\theta, \omega)$ , que refleja tanto las características del enlace como las de la señal de entrada. Así, al tener disponible toda la información de la señal en todos los puntos del esquemático podemos acceder a la señal en el dominio temporal, en cualquier punto del diseño.

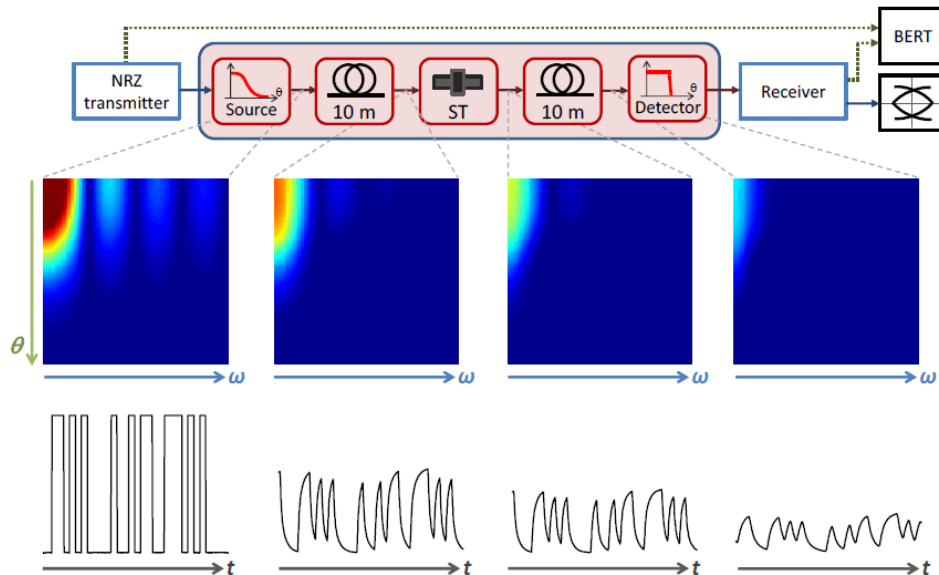


Figura 2-10: Ejemplo de la evaluación de un enlace POF con el método matricial.

La Figura 2-13 muestra un ejemplo de la simulación mediante el enfoque mejorado de un enlace POF compuesto por dos tramos de 10 m de fibra unidos por un conector ST a través del cual se transmite una señal con codificación NRZ. Además de observar la pérdida de potencia de la señal en el dominio

temporal en cada punto del enlace, podemos por ejemplo, ver como se esparce la potencia en la dimensión angular, debido a la dispersión modal introducida por los tramos de fibra o darnos cuenta de la reducción que sufre el ancho de banda.

Esta nueva estrategia de afrontar la simulación de enlaces POF con el modelo matricial fue implementada con éxito en una plataforma genérica de simulación de sistemas dinámicos [ref]. Sin embargo, al no tratarse de un entorno de simulación específico para comunicaciones ópticas, no pudo desarrollarse como hubiera sido deseable debido a la dificultad de modelar otras características físicas de fuentes y detectores ópticos unido a la poca madurez de las técnicas necesarias para obtener las prestaciones (BER) del sistema disponibles en la plataforma.

Por otra parte, el interés suscitado por el modelo POF del grupo entre los desarrolladores del software de simulación OptSim de RSoft fue patente cuando la versión 2015.06 del software introdujo por primera vez un modelo de fibra óptica de plástico [ref] basado en el mismo. Desde ese momento se ha mantenido contacto con la empresa actuando como usuarios de su modelo y aportando ideas de mejora. Paralelamente, se ha aprovechado de las capacidades de OptSim de co-simulación con Matlab y tratamiento de información espacial a través de la plataforma ModeSYS para integrar de forma más eficiente el modelo matricial tal y como se detallará en el Capítulo 4 de esta memoria.

# Capítulo 3: El software de simulación OptSim

---

Este capítulo nos hablará del entorno software de simulación óptica OptSim, en especial de su capacidad de trabajar con la información espacial contenida en las señales ópticas gracias a su plataforma ModeSYS, que cuenta con un bloque de librerías que permiten simular fuentes, detectores, fibras y una gran variedad de componentes ópticos, usados habitualmente en las instalaciones de fibra óptica sin olvidar las características espaciales de las mismas.

Analizaremos en detalle el modelo que ofrece desde versiones recientes para el análisis de fibras de núcleo de gran diámetro, y en su capacidad de co-simulación con Matlab. Esto último nos permitirá introducir los códigos del modelo matricial que ya hay desarrollado en ese lenguaje.

## 3.1 Aspectos generales

OptSim es un software de simulación de comunicaciones ópticas comercializado por RSoft Synopsys Inc., que permite diseñar sistemas ópticos y simularlos para evaluar el rendimiento antes de su despliegue físico. Su interfaz gráfica nos representa un sistema de comunicaciones ópticas como un conjunto bloques interconectados, en el que cada bloque representa un componente o subsistema de comunicaciones, a través del cual se transmiten las correspondientes señales de estudio. Estos bloques aunque representados externamente al usuario con un icono, internamente se definen a través de estructuras de datos sobre las que se aplican algoritmos numéricos más o menos complejos.

OptSim incluye un extenso conjunto de librerías con los componentes más usados en sistemas electro-ópticos y la mayoría de modelos de componentes y algoritmos de simulación presentes en los documentos de investigación de las publicaciones profesionales. Además incluye grupos de parámetros de forma que estos componentes representen los productos comerciales más habituales, y colaboran con especialistas de renombre en los mayores centros de tecnología óptica, con el objetivo de expandir y mantener actualizada dicha librería.

También posee varias herramientas destinadas al análisis de resultados y al post-procesado de la información, gráficas de representación de señales, diagramas de ojo, o gráficas para análisis de BER en función de diferentes parámetros pueden ser colocadas en cualquier punto del diagrama de bloques. Entre otras, podemos encontrar gráficas de espectro de la señal, de chirp frecuencial, mapas de dispersión, análisis de ruido, de *jitter*, interferencias electromagnéticas o *crosstalk* y numerosas herramientas enfocadas a que el usuario pueda trabajar de manera interactiva, y sea capaz de presentar los resultados de la simulación de la manera adecuada para su posterior análisis.

Una de las características más interesantes de OptSim, es que permite al usuario la creación de bloques personalizados. Los modelos que regulan estos bloques puede ser escritos en lenguajes como C++ o FORTRAN, y como hemos comentado al principio de este capítulo, debido a que posee compatibilidad con la interfaz de **Matlab**, también pueden ser escritos en este lenguaje,

posibilitando así la co-simulación de ambos entornos en el mismo diseño, o permitiendo el uso de las capacidades de post-procesado de Matlab en los resultados de simulación.

La plataforma **ModeSYS**, la cual describiremos brevemente en este capítulo, permite incluir en el entorno de simulación de OptSim las características espaciales de la señal, las cuales son de vital importancia en fibras POF, debido a su elevado grado de multimodalidad. Esta característica junto con la co-simulación con Matlab han sido las claves que han diferenciado y establecido a OptSim, como el candidato para este proyecto.

### 3.1.1 Modos de simulación

OptSim nos permite dos modos de simulación complementarios, el modo bloque y el modo muestra. En el **modo bloque**, se transmite toda la información de la señal en toda su extensión temporal agrupada en un único bloque de datos, el cual se va propagando entre los diferentes componentes. Gracias a esta característica, los modelos y algoritmos que representan los componentes pueden trabajar de manera sencilla con la señal completa, permitiéndoles transformar la señal del dominio temporal al frecuencial y viceversa, para operar los datos en el dominio más conveniente en cada caso. Al contrario que en el modo bloque, en el que cada componente sólo transmite datos al bloque correspondiente una vez en cada simulación, en el **modo muestra** los datos que se propagan entre componentes representan una sola muestra o unidad de tiempo, y cada componente transmitirá una nueva muestra al siguiente para cada paso de la simulación. Esto nos permite realizar una simulación durante un tiempo ilimitado pudiendo aceptar señales de transmisión de una extensión muy elevada o desconocida. En este modo el procesamiento de la señal siempre es realizado en el dominio del tiempo.

El modo bloque ha sido el elegido para el desarrollo de este proyecto, ya que se ajusta mejor a nuestras necesidades. Nuestro objetivo es crear una nueva librería para OptSim, que contenga bloques para enlaces POF en los que se ha integrado el modelo matricial del grupo GTF. La señal transferida entre bloques según este modelo es una matriz que contiene toda la información espacio-temporal de la señal transmitida, por tanto no es necesario conocer muestra a muestra como el modelo trata la señal. De hecho, OptSim únicamente incluye bloques ModeSYS en modo bloque. De forma adicional, contaremos con la ventaja de que las simulaciones son más rápidas en este modo, hecho que facilita el trabajo realizado en este proyecto en el que se deben realizar muchas simulaciones para garantizar la correcta integración del modelo. OptSim ofrece mecanismos de análisis de variables anidadas, que nos permiten definir los parámetros de algunos componentes como variables, y realizar un conjunto de simulaciones barriendo esas variables por rangos, o incluso por distribuciones estadísticas definidas por el usuario, permitiendo el estudio de esos parámetros en el enlace o la optimización del diseño. Además este mecanismo incluye algoritmos de optimización, de manera que sólo los componentes afectados por los cambios vuelven a ser recalculados, obteniendo así una herramienta de análisis muy eficiente temporalmente.

### 3.1.2 ModeSYS: tratamiento de información espacial

Como hemos dicho, ModeSYS es una de las razones por la cual se eligió este software de simulación para el desarrollo del proyecto. Esta plataforma de simulación integrada con OptSim, es la primera herramienta comercial diseñada para simular de forma precisa sistemas ópticos multimodales.

ModeSYS realiza cálculos detallados del campo espacial, encubriendo al usuario la complejidad asociada que conlleva el estudio de las señales ópticas multimodales, e implementando una manera sencilla de analizar estos sistemas. Esto aporta la capacidad a los usuarios de evaluar tanto las características temporales, como las angulares o espaciales, correspondientes a la señal óptica que se propaga en la simulación, y permite el análisis de tecnologías de comunicación estandarizadas como Ethernet.

La librería de ModeSYS contiene una gran variedad de bloques que tienen en cuenta la información espacial asociada a señales ópticas, lo que resulta de especial importancia al simular sistemas con lentes, aperturas o fibras con grandes dimensiones, como es el caso de las comunicaciones basadas en POF. Algunos de los análisis que podemos encontrar incluyen: retraso diferencial de los modos, ancho de banda modal efectivo, distribución de la energía, acoplamiento modal, diagramas de ojo, análisis de transitorios, espectro frecuencial, curvas BER...

### 3.1.3 CCM: co-simulación con Matlab

En este apartado vamos a describir el bloque de co-simulación con Matlab (*Custom Component for Matlab*, CCM) en profundidad, ya que es la llave que nos ha permitido integrar el modelo matricial del GTF de la Universidad de Zaragoza, y es el elemento central en torno al que ha girado el proyecto.

Para definir modelos de componentes en Matlab, añadirlos al entorno OptSim y reproducirlos en la simulación junto con los modelos nativos de OptSim, sólo es necesario realizar tres sencillos pasos:

1. Escribir el código fuente del modelo usando el lenguaje de programación en Matlab (M-file).
2. Definir los parámetros que caracterizaran al modelo en un archivo de texto con formato DTA.
3. Usar el bloque definido en OptSim como CCM.

#### 1.- Escribir el código fuente en Matlab

Los modelos que crea el usuario en Matlab, reciben de OptSim los parámetros que contiene el componente en la simulación y que están definidos en el archivo DTA, junto con los datos de la señal de entrada al componente. Estos modelos están encargados de operar en los datos de la señal de entrada, para producir unos nuevos datos de salida, que representen el efecto que ha tenido el componente en la señal, para posteriormente devolver esos datos a OptSim.

La interfaz de co-simulación crea los parámetros del componente directamente en el entorno de Matlab en forma de variables, que pueden ser de los tipos: `Double`, `Integer` y `String`, de forma que el archivo `.m` puede usar esas variables como si se hubiesen definido al principio del mismo. Los datos se transmiten al modelo como una matriz fila de nodos o puertos de entrada `InNode{i}`, cada uno de los cuales contiene una estructura de datos, que contiene entre otros, los tipos de señales que se están transmitiendo (ópticas, eléctricas o binarias).

```
SignalType: 1
noSignals: 1
Signal: [1x1 struct]
noASEnoises: 0
ASEnoise: [1x1 struct]
```

Figura 3-1: Estructura de datos de entrada en el caso de un sólo nodo.

Los nodos de salida definidos en OptSim no contienen señal de datos, sin embargo, están marcados con el tipo de señal con la que deberían estar contenidos, por lo que es muy importante que el modelo establezca en el campo `SignalType` el valor adecuado, correspondiendo los valores 1, 2 o 3 a señales ópticas, eléctricas o binarias, respectivamente. Los valores que pueden contener los puertos de salida son los mismos que los de los puertos de entrada, por lo que sólo un valor que esté presente en la entrada podrá ser seleccionado a la salida.

Los tres tipos de datos presentan estructuras muy similares, así que sólo se muestran ejemplos de las señales ópticas, que además son las únicas que han sido objeto de interés en este proyecto. Como hemos dicho, la señal óptica está representada por una estructura denominada `InNode{i}`, la cual está compuesta por los campos: tipo de señal, número de señales, Señal, número de ruidos y Ruido de emisión espontánea amplificada o ruido ASE (que es un ruido inherente en los láseres). Siendo a su vez el campo Señal y Ruido ASE de tipo estructura, para transmitir datos adicionales relacionados con ambos. A continuación se muestra un ejemplo de la estructura Señal o `Signal`:

```
noPoints: 2048
  Ex: [1x2048 double]
  Ey: []
  tStep: 9.5223e-11
  startTime: 0
  bitRate: 1.0255e+07
  wavelength: 6.4500e-07
  RIN: 1.0000e-15
  patternLength: 16
  distance: 0
  accumDispersion: 0
  SpatialX: [1x1 struct]
  SpatialY: []
```

Figura 3-2: Ejemplo de la estructura del campo Señal definido en un nodo del componente.

En esta señal podemos encontrar datos como: el número de puntos que contiene la señal, la señal óptica compleja en la polarización del eje x, que contiene las muestras de la **señal en el dominio del tiempo** (esta señal tiene como unidad  $W^{1/2}$ ), el periodo de muestreo, la tasa de transmisión en bits/s, la longitud de onda, la longitud en bits del patrón de secuencia pseudoaleatoria que generó la señal, y en concreto una nueva estructura llamada `SpatialX`, que contiene la información espacial de la señal para la polarización x.

Cuando utilizamos bloques en OptSim que tengan en cuenta la información espacial de la señal, como por ejemplo el bloque CCM con el que modelaremos la POF, podemos encontrar una pestaña dentro de las propiedades del bloque llamada `Spatial`. Dentro de las características espaciales definidas en esa pestaña, su primer parámetro, denominado `spatial_handling`, puede tomar tres valores diferentes: `auto`, `matrix` y `none`. Es muy importante configurar correctamente este parámetro, ya que sólo escogiendo el valor `matrix`, seremos capaces de manipular la información espacial en Matlab. En el caso de escoger `auto`, OptSim interpreta que el contenido espacial de la señal a la salida será al mismo que a la entrada del componente, en este caso, el campo `SpatialX` es transmitido al entorno de Matlab pero OptSim no será capaz de reproducirlo posteriormente si es alterado. Y en el caso de `none`, la información transmitida a Matlab no contiene el campo `SpatialX`.

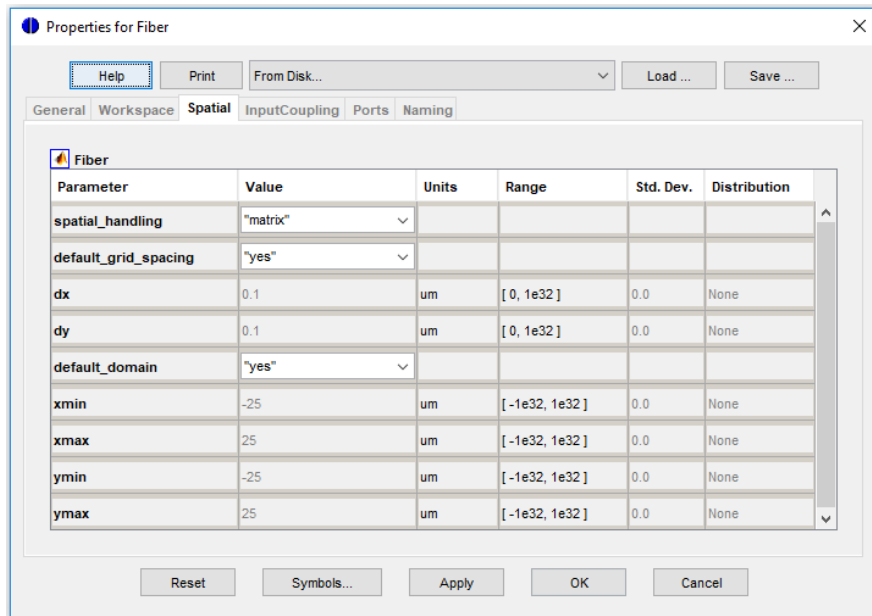


Figura 3-3: Propiedades espaciales del componente.

Podemos ver un ejemplo de la estructura `SpatialX` a continuación:

```

1: 0
m: 0
Neff: -1.0000e+30 + 0.0000e+00i
GroupVelocity: 0.0000 + 0.0000i
Dispersion: 0.0000 + 0.0000i
nx: 237
xmin: -50
dx: 0.4237
ny: 237
ymin: -50
dy: 0.4237
Field: [237x237 double]
ModeType: 0

```

Figura 3-4: Contenido del campo `SpatialX`.

Los datos más importantes de esta estructura son: el número de puntos en los ejes  $x$  e  $y$ , los valores mínimos del eje  $x$  e  $y$  expresados en  $\mu\text{m}$ , los pasos en los ejes  $x$  e  $y$ , también expresados en  $\mu\text{m}$  y por último el campo `Field`, que es una matriz bidimensional normalizada que representa el perfil modal con respecto a coordenadas cartesianas  $\psi(x,y)$  y contiene la **información espacial de la señal**, referenciando el punto central de la matriz al eje de propagación en la simulación. Es muy importante recordar que para OptSim esta matriz debe estar normalizada, de tal forma que su producto escalar sea igual a 1. Es decir, considerando una rejilla  $[i,j]$  en la que los ejes  $x$  e  $y$  están discretizados con pasos  $dx$  y  $dy$ , respectivamente, se debe cumplir que:

$$\sum_j \sum_i |\psi[i,j]|^2 \cdot dx \cdot dy = 1. \quad (3-1)$$

Es muy importante que las distribuciones espaciales de las señales involucradas en la simulación de OptSim mantengan esta condición, ya que de caso contrario las señales en el dominio del tiempo (`Signal.Ex`) modificarán su amplitud lo que falseará los resultados referentes a la potencia óptica.

La señal de salida debe ser devuelta a OptSim con el nombre `OutNode{i}` y manteniendo la misma estructura que `InNode`.

## 2.- Definir los parámetros del modelo en un archivo DTA

Cuando cargamos un bloque personalizado en el diseño, como por ejemplo el CCM, sus propiedades están representadas por un cuadro en blanco, a excepción de un menú desplegable con la opción “Modelo No Especificado” en la parte superior central del mismo. Cada uno de los modelos existentes que podemos elegir está asociado a un archivo con formato DTA y deben ser creados dentro del directorio de instalación de OptSim: RSoft/products/optsim/block\_mode/usermodels.

El archivo DTA define todos los parámetros del componente y les asigna su valor por defecto, está formado por dos partes, la cabecera y el listado de parámetros.

```
MatlabMutimode
MODELNAME MatlabMultiMode
ICONFILE matcosim.bmp
DLLFILE matcosimR2013a.dll
ENTRYNAMEROOT matcosim
FUNCTIONCODES E
MODELABBREV MatlabMultiMode
TOOLTIP "Demo Spatial Matlab Model - Plastic Fiber"
ICON MatlabCosimulationPlotIcon 0 0
NOTE MatlabModelName
MININPUTS 1
MAXINPUTS 1
MINOUTPUTS 1
MAXOUTPUTS 1
NUMINEQNUMOUTNODES TRUE
NUMINPUTS 1
NUMOUTPUTS 1
INSIGTYPES OpSigType
OUTSIGTYPES OpSigType
SORTEDPARAMETERS FALSE
```

Figura 3-5: Ejemplo de la cabecera de un archivo DTA.

La cabecera comienza con el nombre del componente y continúa con unas palabras clave y sus valores: `MODELNAME`, `MODELABBREV` y `TOOLTIP` corresponden con el nombre que tendrá el modelo en OptSim, su abreviatura y una descripción de referencia para el icono, en ese orden respectivamente. `ICONFILE`, `DLLFILE`, `ENTRYNAMEROOT`, `FUNCTIONCODE` siempre deben tener el valor indicado. Y el resto de palabras definen el número de puertos de entrada y de salida y de qué tipo pueden ser las señales que corresponden a esos puertos (ópticas, eléctricas o binarias).

```
PARAM <name> DoubleType
GROUP <string>
MINVALUE <scientific>
MAXVALUE <scientific>
VALUE <scientific | variable name | expression>
UNITS <string>
ENDPARAM
```

Figura 3-6: Sintaxis para definir un parámetro de tipo Double.

Principalmente podemos definir tres tipos de parámetros en el archivo DTA: `DoubleType`, `IntType` y `StringType`. Todos empiezan con la palabra clave `PARAM` en la que se especifica el nombre del parámetro y el tipo, y acaban con la palabra clave `ENDPARAM`. `GROUP` indica a qué pestaña dentro del componente pertenece ese parámetro, `MINVALUE` y `MAXVALUE` definen los valores máximos y mínimos del parámetro, pudiendo ser una expresión científica en el tipo `Double` o un entero en el tipo `Int`, `VALUE` recoge el valor por defecto y `UNITS` muestra a qué unidad se referencian los tres campos anteriores. En el caso de tipo `String` no existen las palabras clave `MINVALUE`, `MAXVALUE` y `UNITS`, y `VALUE` sólo puede ser una cadena o un nombre de variable.

Existen algunos tipos más, como por ejemplo `EnumType` o `FileType`. El primero es una variante del tipo `String`, en la que existe una palabra clave adicional llamada `FIELD`, que contiene una lista de cadenas. Cuando usamos este tipo en OptSim vemos una pestaña desplegable, que nos permite



asignar a un parámetro del componente una de las cadenas definidas en `FIELD`, a Matlab sin embargo, sólo se le transmite el valor escogido como si fuese un parámetro de tipo `String` normal. El segundo también es como el tipo `String`, pero se deja la palabra `VALUE` sin valor asignado. Cuando lo usamos en OptSim nos permite introducir un archivo como entrada, cuyo uso principal es introducir muestras experimentales del usuario. Este tipo suele usarse acompañado de una palabra clave llamada `REQUIRES`, que incluye el nombre de otro parámetro y un valor/valores, la función de esta palabra clave es inhabilitar el parámetro a menos que se cumpla que el parámetro al que se alude en `REQUIRES` sea igual a alguno de los valores.

### 3.- Usar el bloque CCM

Una vez que hemos creado nuestro código fuente en Matlab, teniendo en cuenta los parámetros transmitidos, el formato en el que es recibida la señal de entrada y las características en las que tiene que ser devuelta. Y hemos definido el archivo de texto DTA que caracteriza los parámetros y las entradas y salidas de nuestro componente, podemos introducirlo en el esquemático de OptSim.

Después de guardar el archivo DTA vamos a la librería de modelos de OptSim, en la que podemos encontrar el bloque CCM en: `Block-ModeModels>CustomModels> CCM`. Lo situamos en el esquemático y accedemos a sus propiedades. En este momento el bloque está vacío, en la parte central superior podemos ver una pestaña con el texto: `ModelNotSpecified`, en la que seleccionar el archivo DTA destinado a ese componente, y una vez seleccionado pulsamos el botón `Load`, lo que actualizará automáticamente nuestro componente con el contenido definido en el DTA.

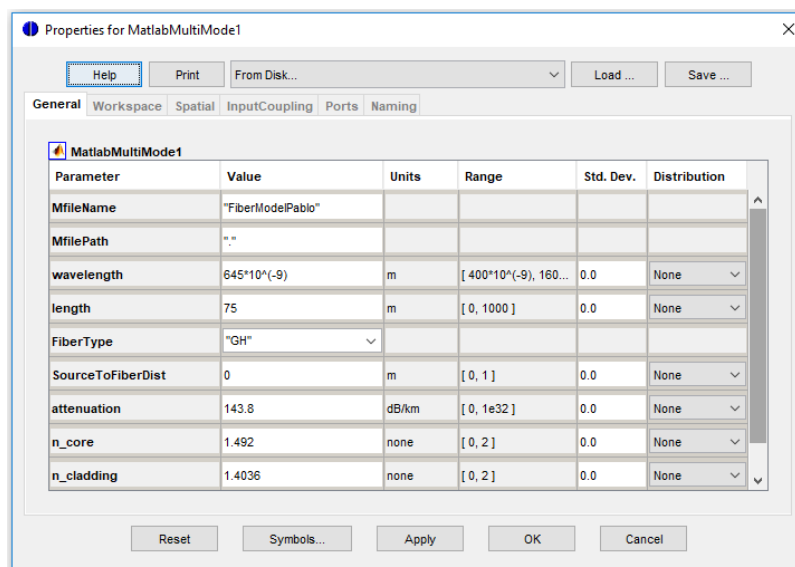


Figura 3-7: Ejemplo de archivo DTA cargado en un componente CCM.

Además de los parámetros y pestañas que han sido definidos por el usuario, encontramos elementos fijos, que existen en todos los CCM. Los dos primeros parámetros de la pestaña `General`, siempre son `MFileName` y `MFilePath`, el nombre del archivo `.m` que contiene nuestro código fuente y su ruta deben ser indicados en estos parámetros, respectivamente. Si la ruta es relativa, toma como directorio origen el que contenga el esquemático de OptSim en el que se ha situado el CCM. La pestaña `Workspace` contiene dos parámetros que nos permiten elegir, si queremos guardar el espacio de trabajo generado en el entorno Matlab al ejecutar el archivo `.m` y el nombre del mismo. Y la pestaña `Spatial`, la cual hemos visto previamente en la Figura 3-3, nos permite modificar

aspectos como los límites inferiores y superiores de la información espacial o el paso de muestreo, pero sobretodo, aquí es donde encontramos el parámetro `spatial_handling`, que como hemos explicado en este apartado previamente define el trato que le vamos a dar a la información espacial de la señal.

## 3.2 El modelo *Large-Core Step-Index Fiber*

Cómo hemos adelantado en la introducción de este capítulo, el marco en el que se ha definido el desarrollo de este proyecto, está formado por la compatibilidad que nos aporta el bloque de co-simulación con Matlab con los códigos de los modelos del grupo y por la capacidad para trabajar con la información espacial de la señal gracias a la plataforma ModeSYS. OptSim nos ofrece desde sus más recientes versiones un modelo de SI-POF denominado *Large-Core Step-IndexFiber (LCSIF)* que consideraremos como referencia para analizar las bondades y los aspectos a mejorar del bloque OptSim resultado de la integración objeto de este proyecto.

### 3.2.1 Funcionamiento general

Este modelo ha sido diseñado con el objetivo de simular fibras ópticas con núcleo de gran diámetro y perfil de salto índice, basándose, al igual que nuestro modelo matricial presentado en el Capítulo 2.2.1, en la ecuación de flujo de potencia de Gloge (2-2). En el caso de OptSim, y de forma análoga a estudios anteriores del grupo [ref], para resolver la ecuación se discretiza el ángulo interno  $\theta$  en  $N$  puntos, y se resuelve la ecuación para cada ángulo discreto  $\theta_i$  mediante métodos numéricos. El conjunto de señales obtenidas para cada ángulo discreto constituye la salida del bloque, si bien existe la opción de realizar la integración sobre la dimensión angular para obtener la señal óptica de salida dependiente únicamente del tiempo.

Existen tres formas de especificar al modelo la **distribución espacial de potencia a la entrada**. La primera consiste en tomar la información espacial disponible a la entrada del bloque. Esto sólo es posible si a la entrada de la fibra se coloca un modelo ModeSYS de una fuente óptica con la capacidad de incluir un perfil modal a su señal de salida, como por ejemplo el *SpatialMode-Locked Laser*. En ese caso la señal de entrada es transformada a una distribución espacial equivalente para la cual se asumen las siguientes suposiciones: la señal de entrada llega desde el espacio libre; todo el ancho de haz del pulso de entrada es capturado por la fibra; la fibra rechaza aquellos ángulos mayores que la apertura numérica y no se tiene en cuenta la atenuación debida a la reflexión de Fresnel.

La segunda consiste en que el usuario especifique la dependencia angular de la señal mediante un fichero, pudiendo estar definida como una distribución espacial de potencia referida a ángulos internos, a ángulos externos o como la potencia de campo lejano contenida en un ángulo sólido (*Encircled Angular Flux*, EAF) referida a ángulos internos o externos. En esta forma el modelo ignorará la información espacial contenida en su señal de entrada, y asume las mismas suposiciones que en el caso anterior.

La tercera forma es aplicable, por ejemplo, cuando la fibra está situada a continuación de otra fibra, por lo que recibe como entrada un pulso equivalente para cada ángulo. El modelo calcula la intensidad de entrada correspondiente a cada  $\theta_i$  siempre que ambas fibras tengan los mismos valores de espaciado angular e índice de refracción. A diferencia de los casos anteriores, aquí el

modelo no rechaza los ángulos mayores que la AN, lo que permite reproducir de manera exacta el comportamiento de una sola fibra con la longitud de ambas. Independientemente de la forma en que se especifique la señal de entrada, al transformar la información espacial asociada a la señal de entrada a una distribución angular equivalente de potencia, cualquier información que hubiese en la fase del contenido espacial se pierde. Y si se introducen varias señales con la misma longitud de onda y polarización, el modelo incoherentemente las combinará sumando sus distribuciones angulares de potencia. Esta tercera variante ha sido incluida en la última versión disponible (2017.03).

Cabe destacar que por defecto el modelo produce un conjunto de señales que representan la potencia asociada a cada ángulo discreto  $\theta_i$  que sirve como solución de la ecuación de Gloge, por lo que no existe información espacial asociada a la señal de salida. Además debido a que este formato no es compatible con otros posibles bloques que se pudiesen colocar a continuación de la fibra, el modelo también nos ofrece la capacidad de combinar todo el conjunto en una única señal de salida.

### Parámetros de configuración

A continuación se van a describir brevemente los parámetros de mayor relevancia en el modelo para fibras de gran diámetro.

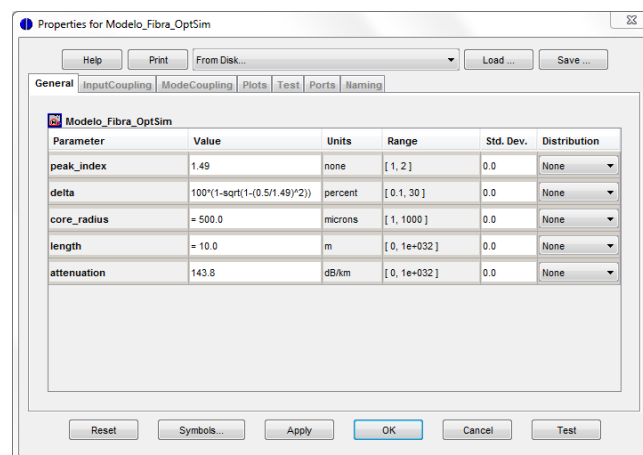


Figura 3-8: Cuadro de propiedades para el modelo LCSIF.

En la pestaña General podemos encontrar: `peak_index`, `delta`, `core_radius`, `length`, `attenuation` y `full_output_integration`, que identifican el índice de refracción del núcleo, el aumento del índice de refracción de la cubierta respecto al del núcleo, el radio del núcleo en  $\mu\text{m}$ , la longitud de la fibra en m, la atenuación de la misma en dB/km y el formato de salida como una única señal o como un conjunto de señales que representan la potencia transmitida en cada ángulo, respectivamente.

En la pestaña `InputCoupling` tenemos los parámetros relacionados con la señal de entrada: `angle_spacing` indica el paso en radianes usado para discretizar el eje de ángulos internos  $\theta$  utilizado para resolver la ecuación de Gloge, `max_angle_expansion` especifica el porcentaje de ángulos permitidos por encima de la apertura numérica, lo cual sirve para tener en cuenta la potencia de propagación que existe en esos ángulos, y por último `input_launch`. Este parámetro nos permite especificar cuál de las tres formas de distribución espacial de potencia inicial de la señal que hemos explicado detalladamente en el Apartado 3.2.1 debe ser seleccionada, en el caso de

elegir la introducción de la información por parte del usuario, ésta será normalizada como vimos en (3-1) para que no afecte a los niveles de potencia propios de la simulación.

En la tercera pestaña, `ModeCoupling`, podemos especificar todos los parámetros relacionados con el acoplo modal: `delta_z` define el paso en metros en el que se discretiza la longitud de la fibra, así como `coupling_coeff_model` y `diff_mode_atten`, que son dos funciones características de la fibra como detallaremos a continuación. Tanto las expresiones analíticas usadas para estas funciones como los valores por defecto de los parámetros que las definen están extraídos de [ref]. A través del parámetro `coupling_coeff_model`, el modelo nos permite elegir entre dos aproximaciones para la función de difusión angular  $d(\theta)$ , la cual, representa el acoplamiento de potencia entre modos durante la propagación. Podemos optar por un la función sigmoide:

$$d(\theta) = D_0 + \frac{D_1}{1 + D_2 e^{\sigma_d^2 \theta^2}}, \quad (3-2)$$

en la que  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  y  $\sigma_d$  son valores experimentales. Como segunda aproximación podemos despreciar la dependencia angular de la difusión y usar un valor constante  $d(\theta) = D_0$ .

En cuanto a la función de atenuación angular  $\alpha(\theta)$ , responsable de la atenuación diferencial entre modos, el parámetro `diff_mode_atten` también nos permite elegir entre dos opciones: En primer lugar tenemos el modelo que considera la dependencia angular de la distribución de potencia en estado estacionario,  $Q(\theta)$  [ref]:

$$\alpha(\theta) = \gamma + \frac{1}{\theta Q(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \theta d(\theta) \frac{\partial Q(\theta)}{\partial \theta} \right), \quad (3-3)$$

donde  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación de potencia que se puede obtener a partir de los perfiles radiales extraídos de medidas de FFP [ref] y  $Q(\theta)$  es una función bisigmoide que depende de los parámetros  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\theta_1$ , y  $\theta_2$  ajustados según valores experimentales.

Mientras que también se puede especificar un modelo cuadrático:

$$\alpha(\theta) = \gamma \cdot (1 + A_2 \theta^2), \quad (3-4)$$

donde  $\gamma$  es de nuevo el coeficiente de atenuación de potencia y  $A_2$  es un parámetro de ajuste.

Finalmente, en la pestaña `Plots` podemos seleccionar que gráficos de salida queremos que se generen en la simulación: `full_input_intensity` representa la distribución espacial de potencia equivalente de entrada antes de forzar a cero aquellos ángulos que superen la AN de la fibra. En el caso de que el parámetro `input_launch` corresponda a la primera opción explicada en el Apartado 3.2.1 o lo que es lo mismo sea igual a `spatial_input`, este gráfico nos sirve para comprobar si se ha producido *aliasing* durante la transformación del Campo Lejano lo que ocurriría si la intensidad no fuese cero a  $90^\circ$ , en cuyo caso habría que modificar el espaciado angular de la fuente. Los gráficos `intensityevolution` y `eaf_evolution` nos muestran la distribución de intensidad promedio en la fibra o la EAF en función del ángulo interno y del externo, y mediante el parámetro `plot_additional_lengths`, e pueden incluir estos resultados a longitudes intermedias adicionales a parte de la entrada y la salida.

### 3.2.2 Aspectos a mejorar

Se han realizado diferentes pruebas y simulaciones con el propósito de entender el funcionamiento interno del bloque Large-Core Step-Index Fiber (LCSIF) de OptSim, la influencia de sus parámetros en la simulación o la forma en la que se realiza la representación de los datos. Como usuario de dicho bloque y durante la fase de desarrollo y ajuste del bloque CCM creado para integrar el modelo matricial en OptSim, se ha detectado que algunos aspectos del mismo son poco adecuados. En particular, el bloque LCSIF es susceptible de mejora desde el punto de vista de usuarios no expertos en las ecuaciones de propagación en fibras ópticas de plástico pero que si pueden requerir estimar las prestaciones o conocer la viabilidad de un enlace POF.

#### **Pérdida de la información espacial en el modelo**

Al comienzo del apartado previo, explicamos que la salida por defecto del mismo consistía en un conjunto de señales que representan las señales ópticas asociadas a cada ángulo discreto  $\theta_i$ : En la Figura 3-9 se muestra un ejemplo de dicho conjunto de señales obtenidas a la salida del bloque para un pulso gaussiano como señal de entrada.

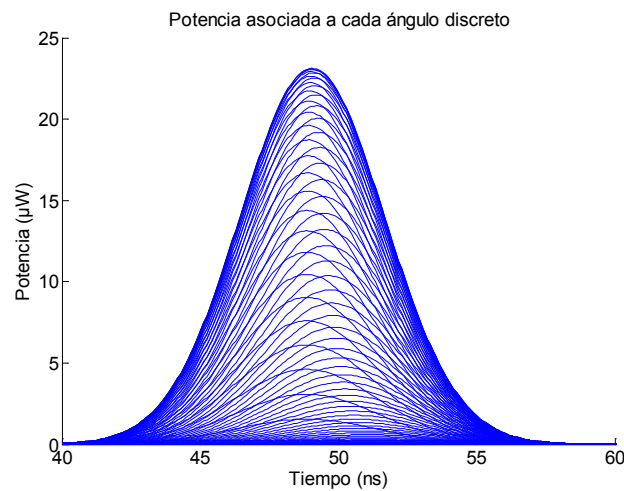


Figura 3-9: Señal de salida del modelo LCSIF.

Como se citó, existe la posibilidad de modificar el formato de salida para obtener una única señal en función del tiempo a través del parámetro de configuración `full_output_integration` que activa la integración de cada señal sobre su correspondiente sección angular.

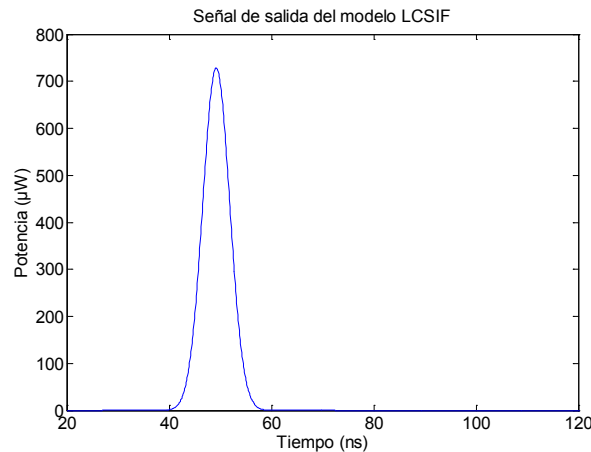


Figura 3-10: Señal única de salida del modelo LCSIF.

Es importante tener en cuenta que, aunque en el primer caso obtengamos información de la distribución de potencia a la salida para cada ángulo, en ninguna de las dos opciones la señal de salida del bloque contiene en su estructura interna campos de información espacial. Así, este bloque no es compatible con bloques posteriores que requieran una entrada con información espacial para su funcionamiento.

### **Interfaz para el usuario al software de simulación más amigable**

Optsim en la mayoría de sus bloques relacionados con la transmisión de señales ópticas tales como Large-Core Step-Index Fiber o Large-Core Connector (introducido en la más reciente versión 2017.03), utiliza los parámetros de configuración `angle_spacing` o `max_angle_expansion`, como mencionamos previamente `angle_spacing` define el paso angular  $\theta_i$  que se aplica para resolver la ecuación de flujo de potencia de Gloge en cada bloque. Esto implica que el usuario debe definir el mismo paso en todos los bloques del esquemático para evitar la aparición de errores o incluso el incorrecto funcionamiento del programa. Se ha visto que esta opción puede resultar algo confusa para un usuario que, aunque posea los conocimientos necesarios para crear esquemáticos de simulación y analizar sus resultados, no tenga conocimientos avanzados sobre el funcionamiento interno de los modelos propios de OptSim. Esta necesidad de conocimientos propios sobre OptSim para su uso está presente en otros componentes, por ejemplo, si al observar el gráfico `full_input_intensity` del bloque LCSIF apreciamos que los valores de intensity en torno a  $90^\circ$  no son iguales a 0, es probable que se esté generando *aliasing* en la representación angular de la señal de entrada que se genera en el láser o fuente del sistema, esto es debido al espaciado definido en el mismo para realizar la transformación de campo lejano de Fourier a partir de la cual se forma la información espacial de la señal. También es aconsejable utilizar un bloque `spatial_analyzer` a la salida de la fuente para comprobar que el contenido espacial de la señal está bien definido dentro de los ejes que lo limitan y evitar la aparición de efectos de borde en la simulación.

Tanto el bloque LCSIF como el de conector POF y los esquemáticos de ejemplos de uso que ofrece OptSim incluyen por defecto valores en sus parámetros extraídos de componentes reales [ref]. Sin embargo, si bien esta configuración de parámetros por defecto permite al usuario usar los bloques de forma inmediata, no resulta operativa cuando se desea ir más allá del caso definido como estándar y analizar sistemas propios.

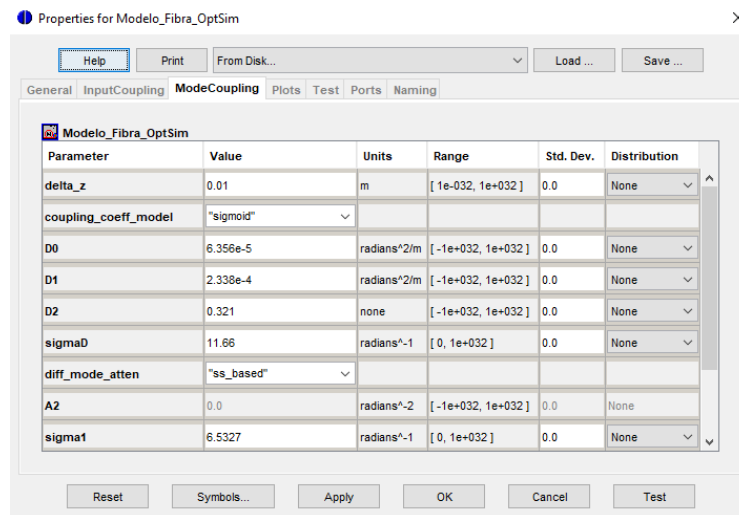


Figura 3-11: Rangos de valores para los parámetros de la pestaña ModeCoupling.

Si nos fijamos en la Figura 3-11, observamos que el bloque LCSIF queda establecido por una alta cantidad de datos muy específicos (ver apartado 3.2.1). Así, realizar simulaciones usando este bloque en las que el usuario requiera, por ejemplo, modificar el tipo de fibra o no es directo ni sencillo de realizar, puesto que requiere que conozcamos todos los parámetros referentes a la nueva fibra.

Adicionalmente, y junto con la escasez de valores adecuados para los múltiples parámetros del bloque, nos encontramos que los rangos de valores asociados a estos parámetros no corresponden con sus rangos de valores realistas, sino con las capacidades de memoria de las variables internas que se han utilizado para definir ese campo. Este hecho se puede apreciar en la columna *Range* de la figura que adopta el intervalo de valores  $[-1e+032, 1e+032]$  para todos los parámetros que estén declarados con esa precisión. Esta enorme libertad para los valores de la simulación, en concreto para las variables globales  $tx\_NA$  y  $tx\_wo\_um$  (hablaremos de ellas con más detalle en el Capítulo 4), permiten al usuario definir señales poco reales o valores extremos, que pueden crear situaciones imposibles en los cálculos como distancias entre componentes negativas, pasos de muestreo en la distribución de potencia angular a la entrada de la fibra de  $60^\circ$  etc... Por ejemplo si tomamos la pareja de valores  $tx\_wo\_um = 1$  y  $tx\_NA = 0.27$ , según lo que explicaremos en el Apartado 4.1.1 la distancia que se establece entre el láser y la fibra es de  $-66\text{ nm}$ !

### **Eficiencia de cálculos: velocidad de ejecución**

Por último, aunque no menos importante, la resolución de la ecuación de flujo de Gloge mediante métodos numéricos resulta lenta para longitudes de fibra largas. En concreto, la velocidad de ejecución del bloque LCSIF depende de dos parámetros (ver apartado 3.2.1):  $angle\_spacing$  y  $delta\_z$ , que definen el paso de discretización del eje espacial (angular) y el del eje de propagación de la luz. Los valores de ambos parámetros presentan un compromiso entre convergencia y exactitud de la solución. Por otra parte, la formulación matricial de los fenómenos implicados en la propagación de la luz a través de la POF aumenta la eficiencia en la obtención de la solución de la ecuación de flujo de potencia; más aún si se usa programación en Matlab para implementar este enfoque.

En el apartado 4.3.2 del siguiente capítulo, se muestran los resultados de un estudio comparativo de los tiempos de ejecución del bloque LCSIF y el bloque resultado de la integración del modelo matricial.



# Capítulo 4: Integración del modelo matricial de POF en OptSim

---

A continuación describiremos cómo se ha creado la librería de componentes POF basada en modelos matriciales compatible con la librería ModeSYS nativa de OptSim. Esta librería está basada en el uso de bloques personalizados de co-simulación con Matlab que deben tener la capacidad de interpretar el formato en el que se transmiten las señales ópticas a través de OptSim, y abstraer toda la información necesaria para cubrir las necesidades de entrada que se definieron en el modelo matricial. Del mismo modo, a la salida de nuestros bloques se debe realizar la conversión de manera inversa para volver a presentar la señal a la salida del componente de forma que mantenga la compatibilidad con el resto de bloques espaciales de OptSim.

## 4.1 Interfaz OptSim-Matlab: aspectos de compatibilidad

En esta sección se van a describir los aspectos a tener en cuenta en el desarrollo de la interfaz entre OptSim y Matlab sin los cuales no es posible la correcta comunicación entre ambas plataformas. Los siguientes apartados sintetizan el conjunto de conocimientos adquiridos fruto del análisis y la exploración de los resultados obtenidos en numerosas simulaciones y las conclusiones a las que estos nos han llevado, constituyendo el núcleo del trabajo realizado.

En cada uno de estos apartados se han desarrollado varios de estos conocimientos mostrando las relaciones entre los mismos de manera ordenada y consistente con el objetivo de hilarlos mediante una secuencia lógica, que permita formar una base de partida a aquel lector interesado en un futuro desarrollo o en la incorporación de todo tipo de componentes o aplicaciones realizadas para POF en otros ámbitos y lenguajes al entorno OptSim.

En el esquemático de trabajo que ha sido caso de estudio para el desarrollo de este proyecto ha consistido en una modificación del que se provee como ejemplo de uso del modelo Large-Core-Step-Index de OptSim (descrito previamente en el Apartado 3.2). Únicamente se ha incluido un bloque CCM denominado “SI\_POF” que realiza la simulación de un segmento de fibra óptica de salto de índice de una longitud determinada por el usuario, utilizando el modelo matricial para describir el comportamiento de la fibra.

Como podemos observar en la siguiente figura, el diagrama de bloques está compuesto principalmente por un láser multimodal, el modelo para fibra de plástico de OptSim mencionado anteriormente y nuestro modelo matricial de SI-POF, además de eso tenemos bloques que nos permiten representar tanto la información espacial de la señal como la temporal antes y después de los modelos de fibra, excepto en el caso de la información espacial a la salida del modelo de OptSim, que como hemos explicado en el Apartado 3.2.2 no es compatible con el analizador espacial. Poder comparar al menos la información temporal de salida de ambos modelos ha sido de gran ayuda durante el proceso de integración del modelo en OptSim.

## 1-mm Simulación Fibra Óptica de Salto de Índice

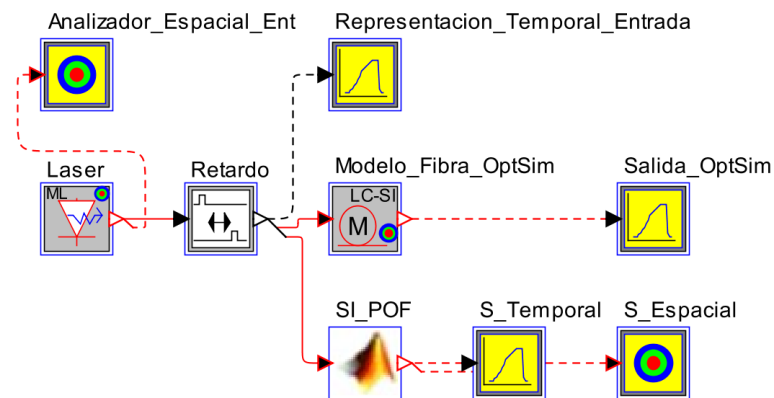


Figura 4-1: Entorno de simulación usado en este proyecto.

### 4.1.1 Salida de la fuente ModeSYS – entrada CCM

Uno de los puntos más importantes de la compatibilidad es la correcta definición de la señal de entrada al modelo matricial de fibra, en concreto de la información espacial de la misma. En el esquemático de trabajo de la Figura 4-1, si buscamos en las propiedades del láser, en concreto, en el parámetro que define el modo de generación de la información espacial ( $x\_Spatial > x\_single\_mode\_type$ ) nos encontramos que la información espacial asociada a nuestro señal de simulación es del tipo Laguerre-Gaussian.

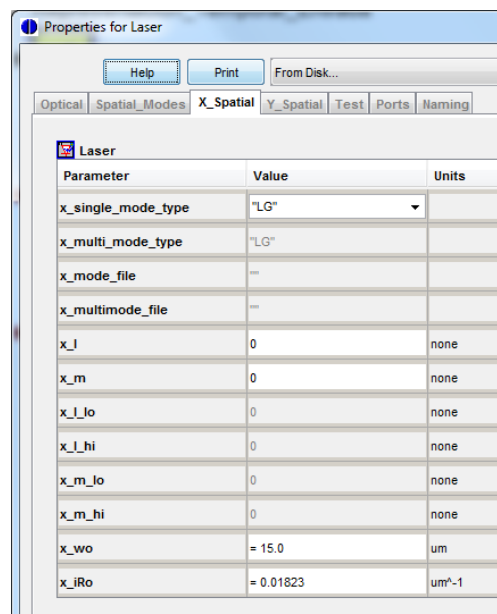


Figura 4-2: Propiedades del láser en referencia al contenido espacial.

Los haces de luz del tipo Laguerre-Gaussian (LG) son un conjunto de soluciones de la propagación de la luz en fibra que pueden obtenerse a través de las ecuaciones paraxiales de Helmholtz en coordenadas cilíndricas  $(\rho, \phi, z)$  usando separación de variables en  $\rho$  y  $\phi$ . Los haces Laguerre-Gaussian de menor orden son equivalentes a un haces gaussianos. Utilizando la herramienta de OptSim denominada *Spatial\_Analyzer*, en la cual podemos observar la información espacial a la

salida del láser podemos obtener resultados como los mostrados en la Figura 4-3. En ella podemos observar la distribución de la intensidad óptica en un plano transversal de haces LG de distintos ordenes  $(l, m)$ . Estas gráficas se han obtenida través de simulaciones modificando los parámetros  $x\_l$  y  $x\_m$  de la pestaña  $X\_Spatial$  de la fuente espacial.

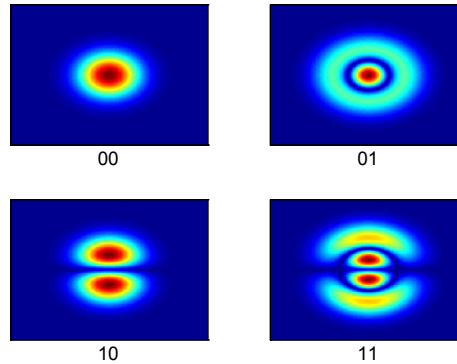


Figura 4-3: Modos transversales del láser en función de los parámetros  $x\_l$  y  $x\_m$ .

En nuestras simulaciones el valor de estos parámetros será  $x\_l = 0$  y  $x\_m = 0$ , es decir trabajaremos con el modo fundamental que es idéntico al de un haz gaussiano. La expresión de la amplitud compleja de la función de onda asociada a un haz gaussiano se puede escribir [ref]:

$$U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} e^{\left[ -\frac{\rho^2}{W^2(z)} \right]} e^{-j \left[ kz + k \frac{\rho^2}{2R(z)} - \zeta(z) \right]} = |U(\rho, z)| e^{-j\varphi(\rho, z)}, \quad (4-1)$$

donde  $A_0$  y la distancia de Rayleigh ( $z_0$ ) son constantes,  $k = 2\pi/\lambda$  es el número de ondas siendo  $\lambda$  la longitud de onda,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  es la distancia radial,  $z$  es el eje de propagación y el resto de variables son parámetros característicos del haz que se pueden obtener a partir de los anteriores:

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (4-2)$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z} \right)^2 \right] \quad (4-3)$$

$$\zeta(z) = \tan^{-1} \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (4-4)$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot z_0}{\pi}} \quad (4-5)$$

Y se denominan respectivamente: radio de haz  $W(z)$ , radio de curvatura del frente de ondas  $R(z)$ ,  $\xi(z)$  representa un desplazamiento de fase conocido como fase Gouy, y  $W_0 = W(z = 0)$  es el mínimo radio de haz o *beam waist*.

Por tanto, las características espaciales de un haz gaussiano se pueden definir a través de distintos parámetros; en concreto, éstas vienen determinadas en el modelo de la fuente por los parámetros mínimo radio del haz ( $x\_wo$ ) y radio inverso de curvatura ( $x\_iRo$ ). El establecimiento de los valores de estos parámetros en OptSim depende a su vez de dos variables globales que el usuario puede definir:  $tx\_wo\_um$  y  $tx\_NA$ , de la siguiente forma:

$$x_{wo} = tx_{wo\_um} \quad x_{iRo} = \sin(tx\_NA)/tx_{wo\_um}$$

De forma que en Optsim la información espacial de la señal de entrada al bloque de fibra se define a través de los parámetros globales  $tx_{wo\_um}$  y  $tx\_NA$ , representando este último la apertura numérica o cono de emisión de la fuente. En la Figura 4-4 se muestra el resultado obtenido con el bloque *Spatial\_Analyzer*, el cual representa el módulo y la fase del modo transversal asociado a la señal emitida por la fuente.

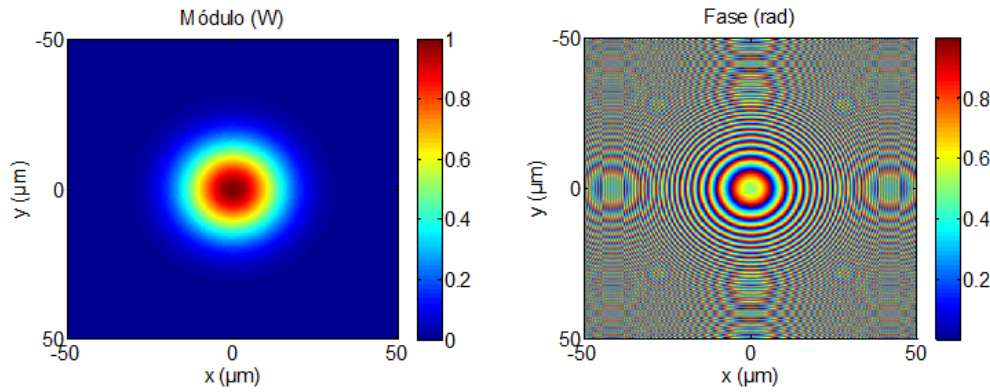


Figura 4-4: Resultados del analizador espacial a la entrada.

Como se puede observar en estas gráficas, a la salida de la fuente, tanto la distribución espacial del módulo del campo óptico como la fase del mismo se describen en coordenadas cartesianas expresadas en  $\mu m$ . Sin embargo, el modelo matricial de fibra debe recibir la información espacial de la señal de entrada a través de su distribución angular (potencia en función del ángulo de inyección). Así, es necesario realizar una conversión que se puede obtener fácilmente a través de la información contenida en este plano si conocemos la distancia ( $b$ ) entre el foco emisor ( $\alpha$ ) y el plano de representación ( $c$ ) que corresponden al láser y a la superficie transversal de entrada a la fibra, respectivamente.

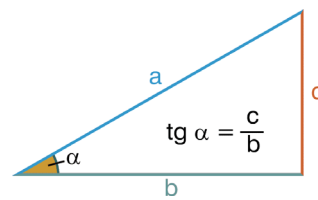


Figura 4-5: Tangente de un ángulo.

Para ello vamos a identificar los parámetros radio del haz ( $x_{wo}$ ) y radio inverso de curvatura ( $x_{iRo}$ ) en las expresiones analíticas que describen un haz gaussiano. La intensidad óptica  $I(\rho, z) = |U(\rho, z)|^2$  puede ser expresada a través de (4-1) como:

$$I(\rho, z) = I_0 \left[ \frac{W_0}{W(z)} \right]^2 e^{\left[ -\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right]}, \text{ con } I_0 = |A_0|^2. \quad (4-6)$$

Y dado que tenemos simetría de revolución, si realizamos un corte en el eje  $y = 0$  y nos quedamos con los valores positivos de las  $x$ , obtenemos el perfil radial gaussiano mostrado en la Figura 4-6, que se corresponde con una variable global  $tx\_wo\_um = 15$ .

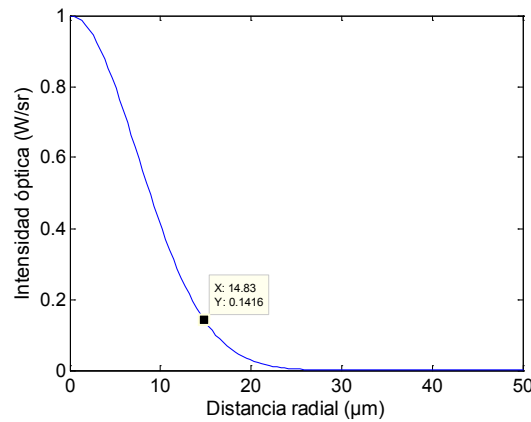


Figura 4-6: Corte del módulo con el eje positivo de las abscisas.

Como se puede observar en la Figura 4-6, el parámetro de OptSim **radio del haz**  $x\_wo$  indica el valor de distancia radial  $\rho$  para el cual **la intensidad ha caído  $1/e^2$  de su valor máximo** (en este caso,  $\rho = 15 \mu m$ ).

Con el objetivo de crear una relación simple entre la anchura del haz gaussiano,  $W(z)$ , y la información espacial que es transmitida por OptSim al bloque CCM (veremos la utilidad de esto más adelante), definimos una función gaussiana mediante la siguiente expresión:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \text{ siendo } a, b \text{ y } c \text{ constantes reales } > 0 \quad (4-7)$$

Para esta función elegimos  $a = 1$  y  $b = 0$ , para que esté normalizado y centrado en el origen y una anchura  $c = \sqrt{1/2}$  simplemente para simplificar. Esta función sintética se puede relacionar con la intensidad óptica del haz gaussiano de la siguiente forma:

$$\frac{\log(e^{-\frac{2}{W^2(z)}\rho^2})}{\log(e^{-\rho^2})} = \frac{-\frac{2}{W^2(z)}\rho^2}{-\rho^2} = \frac{2}{W^2(z)} = m \quad (4-8)$$

De forma, que es posible calcular esta constante  $m$  a partir de la intensidad óptica de la señal generada por la fuente, la cual nos permite a su vez obtenerla anchura del haz a través de la siguiente expresión:

$$W(z) = \sqrt{\frac{2}{m}} \quad (4-9)$$

Por otro lado, si observamos la fase  $\varphi(\rho, z)$  de un haz gaussiano en (4-1) encontramos que está formada por tres términos:

$$\varphi(\rho, z) = kz - \zeta(z) + \frac{k\rho^2}{2R(z)}, \quad (4-10)$$

de los cuales  $kz$  corresponde a la fase de una onda plana y  $\zeta(z)$  representa el retardo de fase relativo de un haz gaussiano con respecto a una onda plana. Ambos términos varían lentamente con respecto al tercero y se pueden aproximar por una constante dentro del radio de haz para cada frente de onda [1]. Por tanto, si realizamos un corte en el eje  $y = 0$  sobre la imagen de la fase como la representada en la Figura 4-4, obtenemos la siguiente parábola:

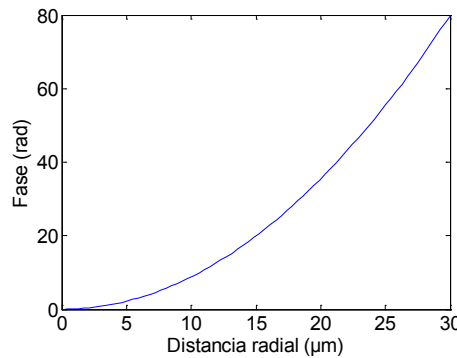


Figura 4-7: Corte de la fase con el eje positivo de las abscisas.

Que puede aproximarse por el tercer término de (4-10):

$$p\rho^2 = \frac{k\rho^2}{2R(z)} = \frac{\pi}{\lambda R(z)} \rho^2, \quad (4-11)$$

siendo  $p$  el coeficiente de la parábola que se puede obtener mediante ajuste a partir de gráficas como la de la Figura 4-7. Por lo que podemos despejar el radio de curvatura  $R(z)$  en función de  $p$ :

$$R(z) = \frac{\pi}{\lambda p}, \quad (4-12)$$

Al igual que se hizo con la interpretación del parámetro  $x_{wo}$  a partir de la información contenida en el módulo de la distribución espacial de intensidad óptica de la señal, se comprueba con el análisis del corte de la fase que el parámetro **radio inverso de curvatura**  $x_{iRo}$  se corresponde con  $1/R(z)$ .

Por tanto, hemos identificado cómo los parámetros  $x_{wo}$  y  $x_{iRo}$ , o por el mismo razonamiento las variables globales  $tx_{wo\_um}$  y  $tx_{NA}$ , determinan las características espaciales de la señal de entrada a la fibra. A partir de esta información y mediante las ecuaciones (4-2), (4-3) y (4-5), se puede obtener una expresión que nos permite calcular la distancia ( $z$ ) entre el láser y la fibra.

$$\left. \begin{aligned} W(z) &= W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \\ W_0 &= \sqrt{\frac{\lambda \cdot z_0}{\pi}} \\ R(z) &= z \left[ z + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \Rightarrow z = \frac{R(z)}{\frac{\lambda^2}{\pi^2 W^4(z)} R^2(z) + 1}, \quad (4-13)$$

donde las constantes  $m$  y  $p$  se extraen de la información espacial de la entrada (ecuaciones 4-9 y 4-12). De este modo, es posible transmitir esta información espacial con el formato adecuado para el

modelo matricial. A raíz de esta expresión, podemos comprobar que para cada par de valores  $tx\_wo\_um$  y  $tx\_NA$  se obtiene como resultado una  $z$  diferente! Es decir, que si modificamos la información espacial de la entrada, estamos a su vez cambiando la distancia que existe entre el láser y la fibra, este efecto se debe a la manera que tiene OptSim de generar la señal de entrada.

Comúnmente el contenido espacial de la entrada de un sistema de comunicaciones POF viene determinado por la AN de la fuente y la distancia fijada entre láser y la fibra. De esta forma, en función de lo colimada que sea la fuente o de la separación que haya entre los componentes, la distribución angular de potencia a la entrada de la fibra será más o menos estrecha y podrán o no ser inyectados en la fibra.

En OptSim también se determina la distribución angular equivalente a la entrada a través de la AN de la fuente, si bien la transformación de campo lejano que realizan y la distancia láser-fibra que consideran no es pública. Este hecho se puede comprobar en la Figura 4-8, en la que se representa la variable  $tx\_AN$  y el gráfico del modelo LCSIF `full_input_intensity` que, según explicamos, representa la distribución espacial de potencia equivalente de entrada antes de forzar a cero aquellos ángulos que superen la AN de la fibra:

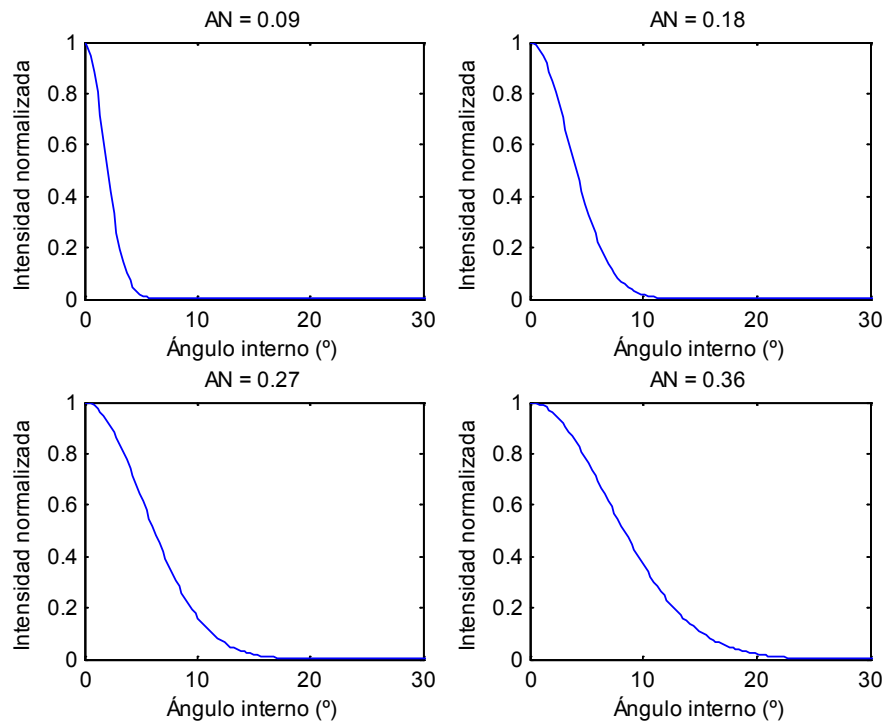


Figura 4-8: Distribución espacial de entrada en función de la AN de la fuente.

No obstante en vez de especificar la distancia hasta la fibra, como veíamos en la Figura 4-6 se fija la anchura de la distribución espacial de la señal en el plano perpendicular al eje de propagación justo a la entrada de la fibra mediante la variable  $tx\_wo\_um$ , modificándose la distancia existente entre láser y fibra de forma que se cumplan ambos requisitos. Si nos fijamos en la Figura 4-5, lo que estamos haciendo es en vez de fijar  $\alpha$  y  $b$ , fijamos  $\alpha$  y  $c$  y calculamos  $b$ . De este modo, modificar la variable  $tx\_wo\_um$ , no cambia la distribución mostrada en `full_input_intensity`, pero es directamente proporcional a la distancia ente componentes generada y la variable  $tx\_AN$  es

directamente proporcional a la anchura de la distribución angular de entrada que vemos en `full_input_intensity` e inversamente proporcional a la distancia generada.

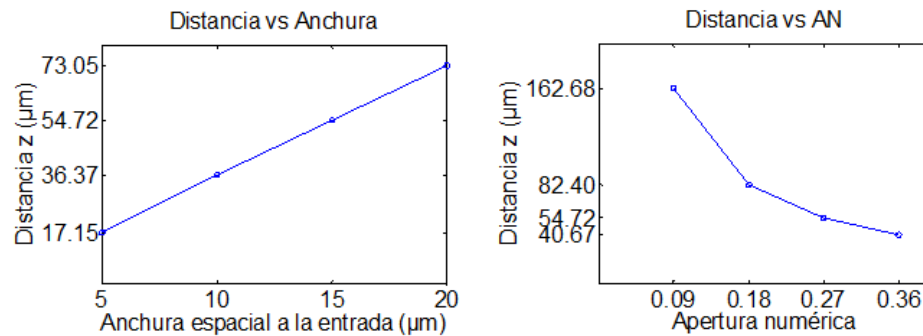


Figura 4-9: Comportamiento de la distancia entre láser y fibra en función de las variables `tx_wo_um` y `tx_NA`.

#### 4.1.2 Salida del CCM – entrega señal a OptSim

Otro de los puntos más importantes de la compatibilidad OptSim-Matlab es el Auto-Producto Interno, en el Capítulo 3.1.3 veíamos como está formada la estructura de las señales que son transmitidas a través de los puertos de entrada del bloque CCM, en concreto se habla en detalle del contenido de las mismas en el caso de que sean una señal óptica.

En ella existe una estructura de datos denominada `SpatialX`, cuyo contenido se muestra en la Figura 3-4, la cual contiene la información espacial de la señal óptica, y está formada principalmente por los límites de los ejes, el paso de muestreo y una matriz bidimensional de datos (`Field`) que es la que observamos como salida del bloque `Spatial_Analyzer` por ejemplo en la Figura 4-4. Una vez que se entrega la señal de salida por el modelo del componente que se esté simulando de vuelta al archivo `.m` que actúa como interfaz del CCM, es necesario normalizar su contenido espacial como se especifica en (3.1) de forma que su auto-producto sea igual a 1. Esto ocurre porque en OptSim se establece que la información de potencia de la señal sólo debe estar incluida dentro de la estructura `Signal`, que almacena la información temporal de la misma.

Para realizar esto dentro del interfaz, una vez que tenemos la matriz bidimensional con el contenido espacial de salida  $\psi[i, j]$ , se realiza la integración de este campo sobre la cuadrícula  $[i, j]$  manteniendo los pasos de los ejes  $dx$  y  $dy$  en micras e introduciendo un escalado de 0.25 en las esquinas y otro de 0.5 en los bordes para tener en cuenta que la información en estas posiciones se muestrea sobre cuadrados parciales de la cuadrícula. Como resultado obtenemos un factor de normalización que deberá aplicarse a  $\psi(x, y)$  antes de asignarse al campo `OutNode{1}.Signal.SpatialX.Field` del puerto de salida. En la siguiente figura se muestra como ejemplo el segmento de código usado en este proyecto para normalizar el contenido espacial usando para ello una variable auxiliar `inner`:



```

inner = contenido_espacial;
inner(1,:)=1/2*inner(1,:);
inner(end,:)=1/2*inner(end,:);
inner(:,1)=1/2*inner(:,1);
inner(:,end)=1/2*inner(:,end);
inner = OutNode{1}.Signal.SpatialX.dx^2*sum(sum(inner));
contenido_espacial_normalizado = (1/inner*contenido_espacial).^(1/2);
OutNode{1}.Signal.SpatialX.Field = contenido_espacial_normalizado;

```

Figura 4-10: Ejemplo de código para la normalización.

En caso de que no mantengamos este requisito al alterar el contenido espacial de la señal y devolverlo por el puerto de salida del CCM, OptSim generará automáticamente un factor de normalización  $S$  para preservar esta condición que afectará a la señal de salida en su contenido temporal, es decir en `Signal.Ex`.

Por otro lado, además de cumplir con el criterio del producto escalar, para asignar la información de la señal de forma correcta al puerto de salida `Outnode{i}`, debemos tener en cuenta que como se explica escuetamente en el Apartado 3.1.3, Optsim transmite la información temporal de la señal `InNode{1}.Signal.Ex` en términos de módulo de campo óptico (medido en  $W^{1/2}$ ). Por lo que para evitar errores una de los primeros pasos que se han definido en nuestro interfaz es elevar el contenido de `InNode{1}.Signal.Ex` al cuadrado muestra a muestra, y recordar que justo antes de devolver la información a OptSim debemos deshacer este cambio. Por ello, si nos fijamos en las últimas líneas de la Figura 4-10:

```

contenido_espacial_normalizado = (1/inner*contenido_espacial).^(1/2);
OutNode{1}.Signal.SpatialX.Field = contenido_espacial_normalizado;

```

Figura 4-11: Ajuste de la señal de salida al formato adecuado.

Además de mantener el requisito del auto-producto interior, deshacemos el cambio para conservar las unidades en  $W^{1/2}$ .

### 4.1.3 Corrección de problemas con pulsos estrechos y tasas de muestreo elevadas

Durante el transcurso de pruebas con el bloque CCM generado, una de ellas consistió en evaluar los resultados en el caso de tener un láser muy colimado, para ello se redujo el parámetro `tx_NA` hasta `0.01` consiguiendo un pulso con toda su información espacial contenida en muy pocos ángulos, caso especial que por desgracia derivaba en problemas en la generación de la matriz de propagación impidiendo obtener resultados de salida representables.

Para evitar estos problemas asociados a pulsos espaciales estrechos y debido a que no podemos modificar el modo en el que se genera la entrada, se le añadió a la interfaz la capacidad de detectar este tipo de situaciones, en cuyo caso se establece un nuevo eje definido desde  $0$  hasta  $45^\circ$  y se realiza un re-muestreo del contenido espacial de la señal de forma que resulte adecuado para la posterior generación de la matriz.

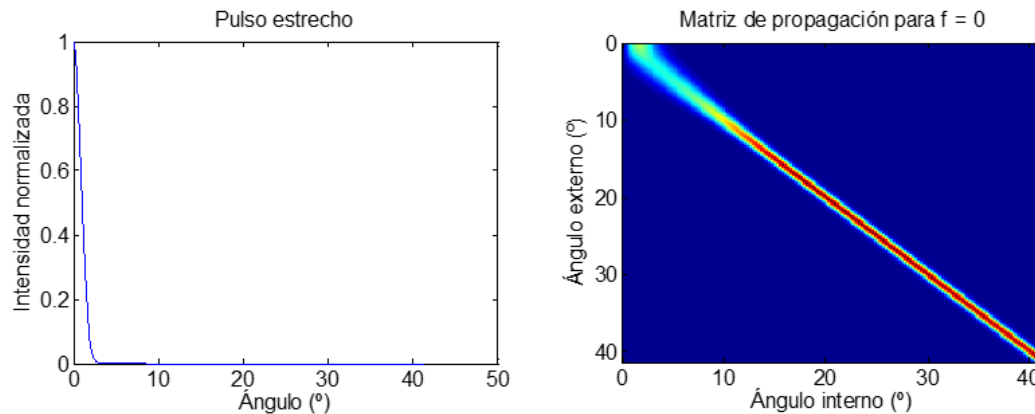


Figura 4-12: Matriz de propagación para pulsos estrechos re-muestreados.

Aunque es cierto que en esta operación hemos sufrido una reducción en el número de muestras que especifican el contenido espacial de la señal y por ello una pérdida de precisión en la información espacial, se definió un valor de re-muestreo lo suficientemente elevado para que no se apreciase distorsión en la señal de salida. A su vez, la introducción de este formateo durante la conversión del contenido espacial de la señal a coordenadas angulares resulta beneficioso en otros casos. En concreto, la señal de entrada de nuestro bloque CCM puede contener un número indefinido de muestras, que dependerá de los parámetros de configuración introducidos por el usuario. Este número de muestras influye directamente en el tamaño de la matriz de propagación de la fibra que, como poder observar gráficamente en la Figura 2-9, se trata de una matriz tridimensional formada por una matriz ángulo de entrada-ángulo de salida para cada valor de frecuencia considerado). Así, es posible que se den situaciones en las que el tamaño de dicha matriz era demasiado elevado y se disparaba su tiempo de generación. La solución a este segundo problema recayó al igual que en caso anterior en realizar el re-muestreo del contenido espacial de la señal, consiguiendo en algunos casos reducir el tiempo de generación de la matriz de más de 13 minutos a un total de 45 segundos, de este modo se revisó el valor de re-muestreo necesario para compaginar ambos problemas alcanzando un compromiso satisfactorio entre velocidad y precisión, resultado del cual, estamos capacitados para admitir como entradas pulsos estrechos manteniendo una pérdida de precisión muy pequeña de forma que no se aprecian diferencias de resolución en las salidas generadas y se establece un límite en la velocidad que mantiene el tiempo de generación de las matrices de propagación en torno a un minuto.

## 4.2 Componentes de la librería POF

Como hemos adelantado en la introducción de este capítulo el objetivo de este proyecto es crear una librería en OptSim que permita la introducción de los modelos desarrollados en la Universidad de Zaragoza para POF, posibilitando el análisis de la información espacial de las señales en un entorno de simulación no sólo a salida del sistema, sino en cualquier punto entre los diferentes componentes del mismo. Por lo cual, cada componente definido en OptSim mediante un bloque CCM de co-simulación estará compuesto al menos por una señal de tipo óptico a su entrada y otra a su salida que contendrán la información temporal y espacial de manera conjunta según el formato nativo de OptSim.

Este bloque invocará a un archivo generado en Matlab que realizará el formato de la señal OptSim de entrada con información espacial y temporal para adaptarla al modelo matricial e introducirá las modificaciones sobre dicha señal propias del componente específico que se desee simular. Una vez aplicado el efecto del componente sobre la señal, se volverá a realizar la conversión de los datos al formato soportado por OptSim.

#### 4.2.1 Fibra óptica de salto de índice

A continuación se va a describir detalladamente el modelo CCM creado para el componente básico de cualquier enlace de comunicaciones POF, la fibra óptica de plástico de salto de índice. Este ha sido el componente POF que hemos utilizado como base para el desarrollo del proyecto, siendo lo suficientemente completo para cubrir todos los aspectos a desarrollar en la tarea de integración. De esta forma, es posible y relativamente sencillo la creación de nuevos componentes para la librería extrapolando en función de las necesidades del nuevo componente, parte o todo el conjunto de los procesos que se realizan en el bloque de SI-POF.

Dentro del entorno OptSim podemos acceder a las características del bloque SI\_POF pulsando el botón derecho en su icono y seleccionando la opción “Propiedades”. Al hacerlo surgirá un panel como el mostrado a continuación:

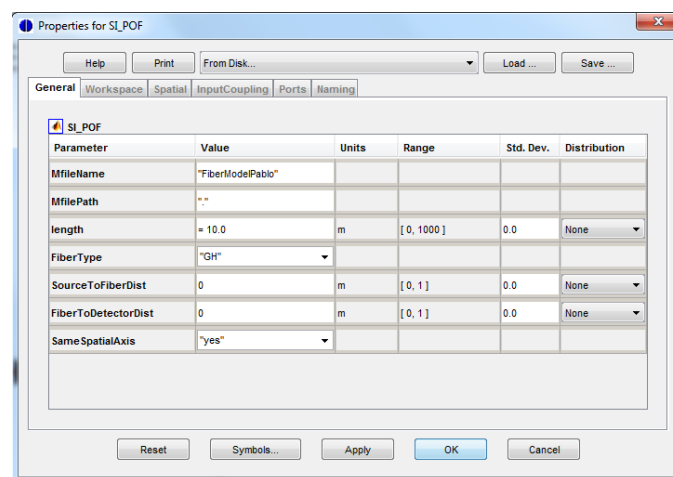


Figura 4-13: Panel de propiedades del componente SI\_POF.

Como explicábamos en el Apartado 3.1.3, el contenido de este panel viene definido por un archivo DTA que hemos creado previamente dentro del directorio habilitado para los modelos de usuario en OptSim. Este archivo se carga al introducir el bloque CCM mediante la pestaña superior central, en la cual al desplegarse podrá ser seleccionado a través del nombre `matlabmultimode`. Para mayor interés sobre el contenido del DTA en el Anexo III puede encontrar una copia del mismo.

Nuestro modelo está compuesto por seis pestañas, de las cuales, *General*, *InputCoupling*, *Ports* y *Naming* se generan a través de la información contenida en el DTA. Como vimos previamente en su correspondiente capítulo, la pestaña *Workspace* es propia del bloque CCM y contiene dos parámetros que nos permiten elegir si queremos guardar el espacio de trabajo generado en el entorno Matlab al realizar la simulación y el nombre del mismo. La pestaña *Spatial* aparece asociada a todos los bloques que manejan la información espacial de las señales y aunque esta explicada en detalle en el Apartado 3.1.3 sí que recordaremos que el parámetro

`spatial_handling` debe tener asignado el valor `matrix`, ya que es un requisito indispensable para poder manipular la información espacial asociada a la señal, en caso contrario la estructura de la señal de entrada al bloque CCM resultaría modificada de tal forma que el contenido que vimos en la Figura 3-4 no existiría.

La pestaña `Ports` contiene la información asociada a la segunda mitad de la cabecera del archivo DTA que pudimos ver en la Figura 3-5 e indica el número de puertos de entrada y de salida así como el tipo de señal que pueden contener, la pestaña `Naming` contiene información asociada a la primera mitad de la cabecera y nos permite especificar el nombre que tendrá el componente en el esquemático mediante el parámetro `ModelInstanceName` siendo en este caso “SI\_POF”.

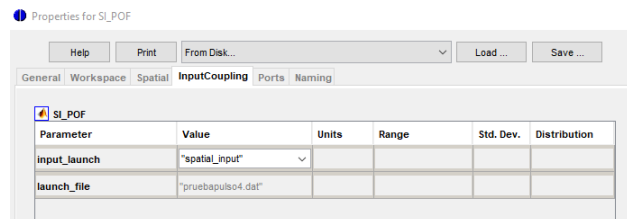


Figura 4-14: Pestaña InputCoupling.

La pestaña `InputCoupling`, ha sido definida con el único objetivo de permitir al usuario (al igual que hace el modelo de fibra de OptSim) especificar la información espacial de la entrada a través de un fichero, en cuyo caso el contenido espacial introducido por el láser no se tendrá en cuenta. Por comodidad para el usuario se ha programado la interfaz de manera que el formato de este archivo sea igual al formato especificado por OptSim para este tipo de funcionalidad, en el Anexo II se puede encontrar una explicación del mismo y un ejemplo. Esta pestaña contiene dos parámetros: `input_launch` que puede tomar tres valores: `spatial_input`, `I_exterior_file` e `I_interior_file`. El primero indica que se debe de tomar la información espacial de la fuente, el segundo y el tercero que la información espacial se obtendrá de un fichero aportado por el usuario, siendo la diferencia entre ellos que la información contenida en ese fichero este asociada a ángulos externos o internos. Y el parámetro `launch_file`, el cual se encuentra deshabilitado en el caso de que el valor seleccionado en `input_launch` sea `spatial_input`, en caso contrario nos permitirá introducir el archivo designado por el usuario.

Por último tenemos la pestaña `General`, que contiene los parámetros para especificar las propiedades de la fibra que se desea modelar. Los primeros parámetros de esta pestaña hacen referencia al código Matlab que describe el comportamiento del bloque y la ruta donde se ubica (`MfileName` y `MfilePath`, respectivamente). El tercer parámetro es `length` y define la longitud de la fibra que se desea simular, el valor por defecto de este parámetro coincide con la variable global definida en el entorno OptSim, por lo que para modificar la misma se recomienda variar la variable global.

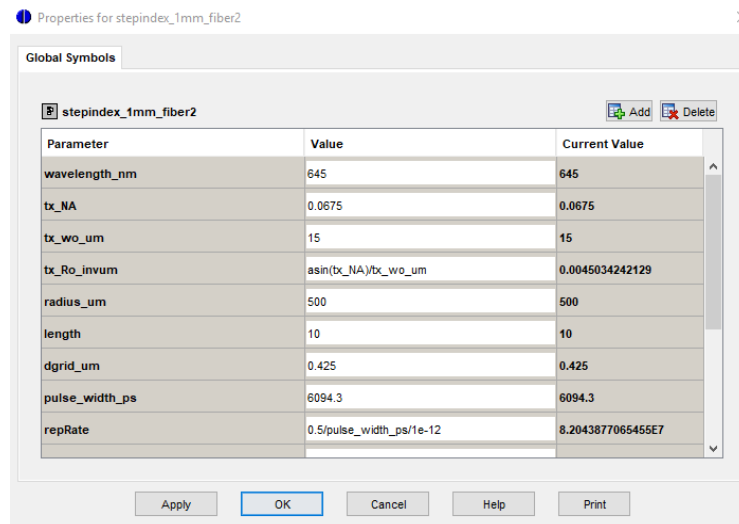


Figura 4-15: Variables globales del entorno de simulación para fibra óptica de salto de índice.

El parámetro `FiberType` contiene las diferentes fibras que es capaz de modelar nuestro bloque, en concreto: GH, HFB, PGU y BH que corresponden a ESKA PREMIER GH4001 de Mitsubishi, HFBR-RUS100 de Agilent, PGU-FB1000 de Toray y BH4001 de Mitsubishi [8]. Relacionándolo con el apartado 2.2.1, estas son las fibras que usó el grupo GTF para obtener de manera experimental los patrones de campo lejano, los cuales servirían para caracterizar las funciones de atenuación  $\alpha(\theta)$  y difusión  $d(\theta)$  de cada fibra y posteriormente para la creación del modelo matricial. En el modelo de OptSim el símil a este parámetro corresponde a la pestaña `ModeCoupling` explicada en el apartado 3.2.1, en la cual introducíamos un conjunto de valores experimentales  $D_0, D_1, D_2, \sigma_1, \theta_1, \dots$  que como ya mencionábamos en el mismo apartado no son otros que los valores correspondientes a la fibra experimental GH del grupo GTF publicados en 2006 [ref8 revisar].

El siguiente parámetro es `SourceToFiberDist` cuya utilidad es fijar la distancia que existe entre la fuente y la fibra, cabe destacar que no se tiene en cuenta la atenuación que sufriría el pulso óptico al viajar por el aire esa distancia y que este parámetro no influye en la generación de la información espacial de entrada ya que esta se produce en un bloque previo al componente SI\_POF, la cual viene determinada por las variables globales de OptSim `tx_NA` y `tx_wo_um`. Sin embargo, asociada a la información espacial de la fuente se crea una distribución angular equivalente de potencia a la entrada de la fibra, que dependiendo de la distancia existente entre la fuente y la fibra, es decir, de este parámetro, nos permite filtrar la potencia de aquellos ángulos que geométricamente se posicionan fuera del diámetro físico de la fibra. Como explicamos en el Apartado 4.1.1, OptSim establece una distancia entre la fuente y la fibra diferente para cada conjunto de valores `tx_NA` y `tx_wo_um` que no es conocida por el usuario, para indicar que se desea usar esta distancia en nuestro modelo basta con introducir el valor 0 en este parámetro, en cuyo caso también se realizará el filtrado espacial comentado.

Como penúltimo parámetro, `FiberToDetectorDist` sirve para definir la distancia existente entre el final de la fibra y la posición en la que se colocará el analizador espacial de Optsim, al igual que en el caso anterior no se tiene en cuenta la atenuación del pulso óptico al viajar por el aire esa distancia. Debido a la distribución en diferentes ángulos de la luz a la salida de la fibra, cuanto mayor o menor sea esta distancia, mayor o menor será la expansión de luz que apreciaremos en el analizador, por lo que tan importante es conocer el nivel de intensidad asociado a cada ángulo como

la distancia a la que se está representando. Al igual que en `SourceToFiberDist`, podemos especificar la distancia específica de OptSim (la cual coincide con la distancia de separación entre la fuente y la fibra) mediante el valor 0. Por ejemplo en el caso típico de tener  $t_{x\_NA} = 0.27$  y  $t_{x\_wo\_um} = 15$  como valores de simulación la distancia que genera OptSim entre componentes es  $54.72 \mu\text{m}$ . Si realizamos dos simulaciones variando únicamente esta distancia obtenemos el siguiente resultado en el analizador espacial de salida del modelo SI\_POF:

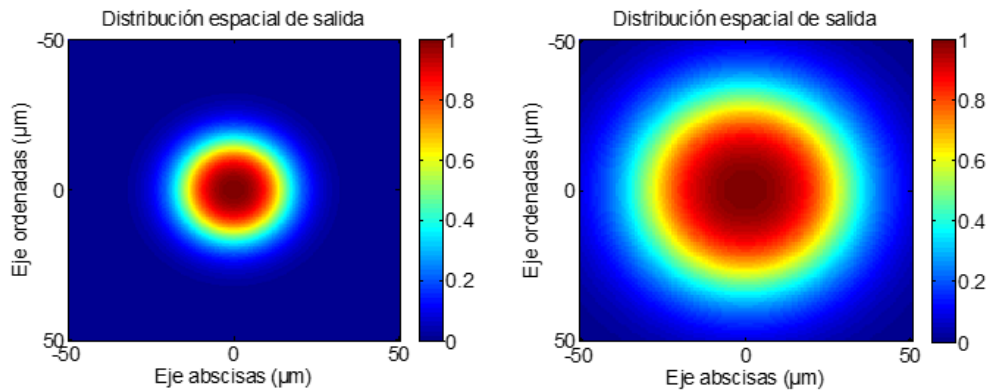


Figura 4-16: Distribución de intensidad a la salida para  $d = 54.72 \mu\text{m}$  y  $2d = 109.44 \mu\text{m}$ .

Para acabar el parámetro `SameSpatialAxis` sirve como ayuda visual destinada al usuario para comparar la señal de entrada con la señal de salida. Como se puede observar en la Figura 4-16, en el caso de que este seleccionado el valor `yes`, ambas representaciones tendrán el mismo eje que la señal de entrada (este eje se define en la generación de la señal óptica dentro del bloque del láser). Por otra parte, en el caso de que el valor sea `no` la señal de salida estará representada en el eje espacial que se haya establecido dentro del modelo. Como ya mencionamos en el Apartado 4.1.3 el eje espacial se modifica dentro del modelo para mejorar la resolución de pulsos estrechos y por motivos de velocidad de cálculo y precisión. Para apreciar mejor el efecto del valor `no`, en la Figura 4-17 pueden observarse los resultados de una simulación con los valores  $t_{x\_NA} = 0.0675$  y  $t_{x\_wo\_um} = 15$ :

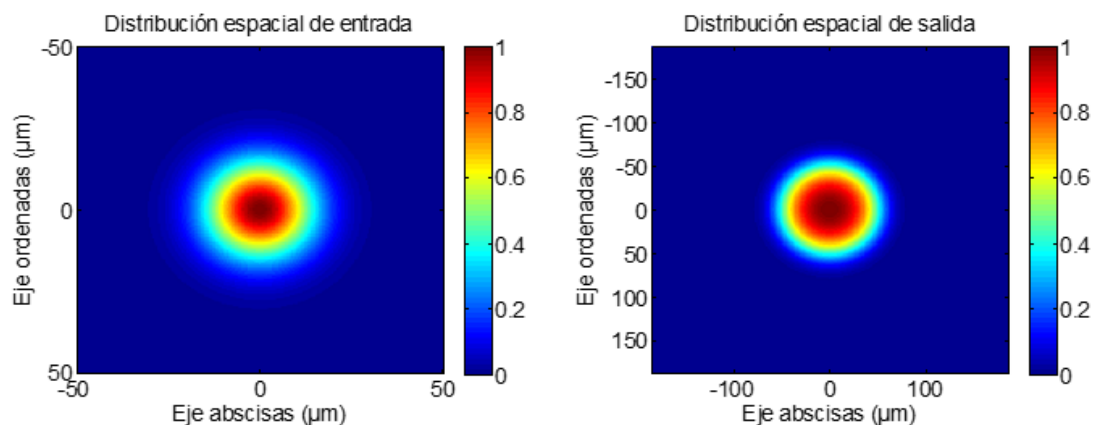


Figura 4-17: Entrada-salida sin mantener los ejes en su representación

## 4.2.2 Conectores

El segundo componente incorporado en la librería OptSim de POF es el conector. El grupo de trabajo dispone de modelos para diferentes conectores ópticos que permiten diseñar una red simple a través de la conectorización de fibras de diferentes longitudes. Para ello se modificó el entorno de simulación usado para la fibra óptica que vimos en la Figura 4-1 eliminando el bloque CCM de la fibra y sustituyéndolo por el bloque diseñado para el conector. En este caso se mantuvo el bloque de fibra de OptSim como elemento de comparación, fijando la longitud de la misma en 10 metros, ya que esta distancia se asemeja a la atenuación introducida por un conector.

### Simulación conectores para POF

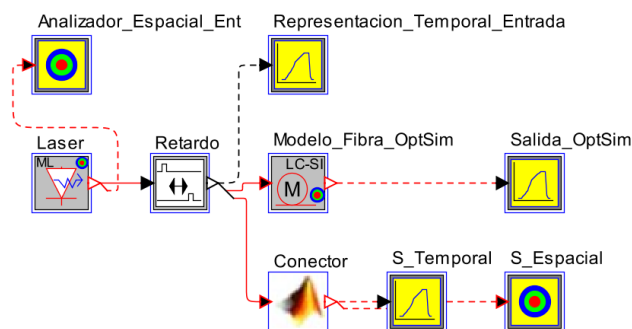


Figura 4-18: Esquemático de trabajo para el diseño del conector.

Al seleccionar las propiedades del bloque CCM del conector visualizaremos el panel determinado por el archivo DTA `matlabconnector` mostrado a continuación:

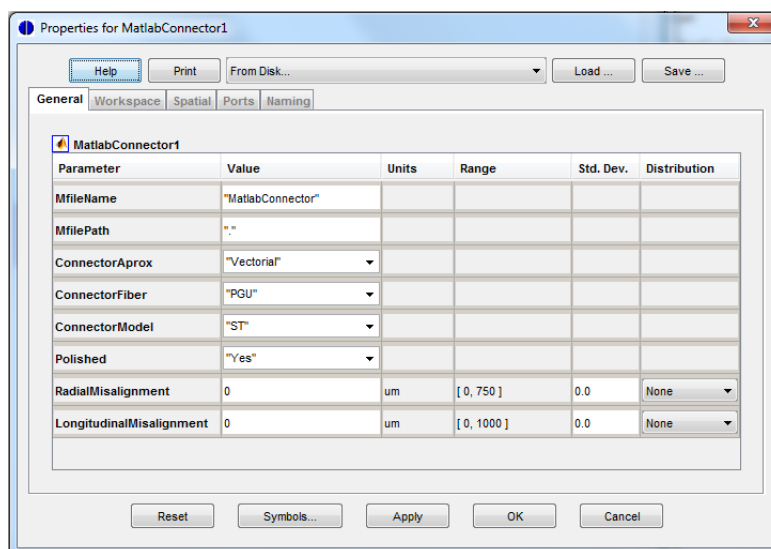


Figura 4-19: Panel de propiedades del conector.

En el cual encontramos de nuevo las pestañas `WorkSpace`, `Spatial`, `Ports` y `Naming` propias del bloque CCM y de los modelos con capacidad de manipular información espacial ya descritas en profundidad entre el Apartado 3.1.3 y el Apartado 4.2.1. Y por último, siendo de nuestro interés tenemos la pestaña `General` específica para este componente, la única diferencia con el bloque anterior es la ausencia de la pestaña `InputCoupling` que no se consideró necesaria para este

componente, ya que el propio modelo ya captura las condiciones de inyección de luz que pueden darse según el tipo de conector y fibra que se conectore.

Centrándonos en los parámetros específicos para el conector (los parámetros `MfileName` y `MfilePath` tienen la misma función que en el bloque previo, y el archivo.m con el interfaz del conector está incluido en el Anexo V), tenemos `ConnectorAprox` que es una pestaña desplegable que puede tomar los valores `Vectorial` o `Constante`, en función de este valor se tomará como aproximación el efecto que produce el conector en la información espacial para cada ángulo interno de propagación en el caso de `Vectorial`, o el efecto producido independientemente del ángulo en el caso de `Constante`. A continuación el parámetro `ConnectorFiber` sirve para seleccionar que tipo fibras son las que se van a conectar, podemos seleccionar entre BH, GH y PGU, mientras que `ConnectorModel` especifica el tipo de conector: `VersaLink (VL)` y `ST` y el siguiente parámetro `Polished` detalla si las terminaciones de la fibra están pulidas antes de ser conectorizadas seleccionando entre las opciones `Yes` o `No`. Para acabar, con el parámetro `RadialMisalignment` podemos especificar si existe algún desalineamiento desde 0 a 750  $\mu\text{m}$  en la dimensión radial entre el núcleo de la fibra y del conector, y con `LongitudinalMisalignment` indicamos la separación existente entre el final de la fibra y el conector pudiendo ser especificada entre 0 y 1000  $\mu\text{m}$ .

### 4.3 Características del diseño de los bloques y comparación con el modelo Large-Core Step-Index Fiber

A continuación vamos especificar algunas de las características más relevantes que se han incluido en los bloques OptSim resultado de la integración realizada en este PFC y que no forman parte de la necesidad de compatibilidad entre los diferentes softwares, pero que definen las capacidades de la misma y las compararemos con el comportamiento correspondiente del modelo LCSIF de OptSim.

#### 1.- Retardo temporal al atravesar la fibra

En cada simulación que realicemos, la señal de entrada debe recorrer una cierta distancia ( $d_{\text{fibra}}$ ) a través de la POF. El tiempo necesario para atravesarla viene determinado por el índice de refracción del núcleo de la fibra ( $n_{co}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$t = \frac{d_{\text{fibra}} n_{co}}{c}, \quad (4-14)$$

siendo  $c$  la velocidad de propagación de la luz en el vacío, lo que provoca que la señal de salida sufra un retardo respecto de la señal de entrada debido a la propagación. Poder ver de forma clara la señal a la salida con el retardo correspondiente, implicaría ampliar el eje temporal de salida de manera indeterminada para cada simulación, pudiendo provocar un incremento del tiempo de cálculo de varias veces el tiempo necesario para realizar el mismo en el caso de no representar este retardo temporal, e incluso provocando fácilmente problemas de escasez de memoria en el ordenador en el que se realice. Debido a esto y también a que visualmente puede resultar incómodo, se ha decidido no representar este retardo físico en nuestro bloque de simulación, coincidiendo en esta decisión con el bloque LCSIF definido en OptSim.



## 2.- Filtrado angular de la entrada

Con el objetivo de mejorar el modelo del componente, y centrándonos en el proceso de acoplo de la señal de entrada a la fibra, debíamos evaluar la información espacial que llegaba a introducirse en la misma teniendo en cuenta dos procesos, el filtrado espacial debido a las dimensiones físicas de la fibra del que hablaremos a continuación y el filtrado angular debido a aquellos ángulos que contienen información espacial de la fuente, pero que superan el ángulo crítico ( $\theta_{i\max}$ ) de la fibra que se esté simulando en ese momento.

$$AN = n_0 \sin(\theta_{i\max}) \quad (4-15)$$

Siendo  $n_0$  el índice refracción del aire y  $AN$  la apertura numérica de la fibra. En esta ocasión este proceso también es realizado por el modelo de OptSim, y para apreciar su efecto se ha realizado una simulación con una  $AN = 0.5$  cuya distribución angular de entrada contiene valores por encima del  $\theta_{i\max} = 30^\circ$  ángulo crítico característico de una fibra GH:

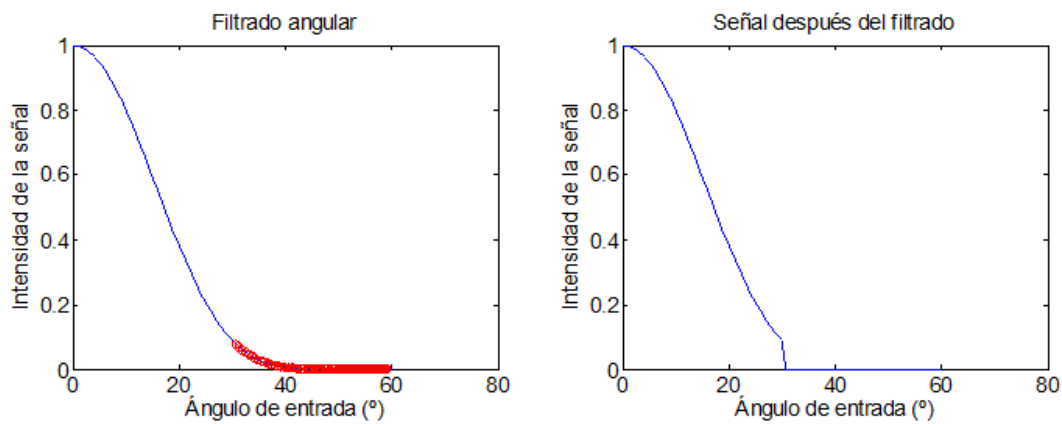


Figura 4-20: En rojo podemos ver las muestras eliminadas debido al filtrado angular.

## 3.- Filtrado espacial de la entrada

Aunque normalmente usemos el bloque `Spatial_Analyzer` para representar la información espacial a la entrada de la fibra en el plano perpendicular a la dirección de propagación del campo óptico de la señal, tanto nuestro modelo como el de OptSim definen una distribución angular equivalente a la entrada de la fibra para evaluar los efectos que provoca el componente en la señal de salida. Una vez que hemos hecho esta conversión obteniendo la información espacial de la señal de entrada referida a cada ángulo de entrada, resulta evidente darse cuenta de que conforme aumenta/disminuye la separación entre el láser y la fibra, la proyección de la información espacial al comienzo de la misma va creciendo/decreciendo en anchura, por lo que puede ocurrir que parte de esta proyección no se sitúe dentro del núcleo de la fibra. Gracias al parámetro `SourceToFiberDist` descrito en el Apartado 4.2.1 podemos filtrar la señal cuya proyección en el plano de entrada de la fibra este ubicada fuera de su superficie, teniendo en cuenta el filtrado espacial de la señal que se produce al entrar en la fibra, en contraste con el modelo de OptSim en el que uno de los supuestos mencionados en el Apartado 3.2.1 es que todo el ancho de haz del pulso de entrada es capturado por la misma.

#### **4.- Definición de la distancia entre componentes a la salida del modelo**

De forma análoga y como comentábamos al describir el parámetro `FiberToDetectorDist` en el Apartado 4.2.1, al generar nosotros la distribución angular de la salida podemos especificar cómo será la distribución espacial a la distancia exacta a la que se encuentre el nuevo bloque del esquemático a través de este parámetro especificado por el usuario. Por el contrario, OptSim asume que la distancia hasta el siguiente bloque es la misma que ha definido entre el bloqueo previo y el modelo de la fibra.

#### **5.- La señal de salida no contiene información espacial de fase**

Al recuperar la información de la señal como salida del modelo matricial en el interfaz somos capaces (como explicamos en el Apartado 2.2.2) de extraer tanto el contenido temporal de la señal como el espacial, sin embargo, la información espacial de la señal no posee contenido en su fase. A su vez en OptSim, al transformar la información espacial asociada a la señal de entrada a una distribución angular equivalente de potencia, también pierde la información espacial.

#### **6.- Se incluyen varios tipos de fibra**

Como se pudo apreciar en la Figura 4-13, en la pestaña `General` del bloque CCM podemos encontrar el parámetro `FiberType` que mediante un desplegable nos permite seleccionar rápidamente entre las diferentes fibras que fueron caracterizadas y modeladas por el Grupo de Tecnologías Fotónicas y que pueden ser simuladas por nuestro bloque CCM. En OptSim cambiar el modelo de fibra requiere introducir los datos experimentales  $\sigma_1, \theta_1, \sigma_2, \theta_2$  para la función bi-sigmoide  $Q(\theta)$  y los datos  $D_0, D_1, D_2, \sigma_d$  para la función de difusión sigmoide  $d(\theta)$  mencionadas en el Apartado 3.2.1.

#### **7.- Generación de la matriz de propagación**

El funcionamiento del modelo LCSIF de OptSim dista principalmente de nuestro bloque, en que ellos discretizan el ángulo interno  $\theta$  en  $N$  puntos, y en cada simulación resuelven la ecuación de Gloge para cada ángulo discreto  $\theta_i$  mediante métodos numéricos. Sin embargo, en nuestro bloque CCM se discretiza igualmente el ángulo interno  $\theta$  y posteriormente se genera una matriz de propagación  $\mathbf{M}(\omega)$  para cada conjunto de los siguientes datos: tipo de fibra, número de puntos en los que se ha discretizado el ángulo, número de puntos en los que está definido el eje temporal de la señal, paso escogido entre cada ángulo, y paso del eje temporal. Aunque inicialmente esto conlleva un aumento del tiempo de simulación puesto que el tiempo de generación de la matriz de propagación es considerable, una vez que se ha generado queda almacenada en una carpeta llamada `BaseDatosM` que está situada en el mismo directorio que el esquemático, y que permite (como veremos en el Apartado 4.3.2) reducir drásticamente el tiempo de simulación. Además debido a que el CCM no tiene capacidad para almacenar gráficas en el propio bloque, al contrario que el bloque para el modelo LCSIF en el que podemos visualizar las funciones de atenuación  $\alpha(\theta)$  y difusión  $d(\theta)$  características de la fibra en simulación, se incluyó la creación y almacenaje de estas funciones junto con la matriz de propagación.



	GH_110_1025_0.44359_10501616264.3782	26/08/2017 20:28	MATLAB Data	193.140 KB
	GH_110_1025_0.44359_10501616264.3782A	26/08/2017 20:28	MATLAB Data	2 KB
	GH_110_1025_0.44359_10501616264.3782D	26/08/2017 20:28	MATLAB Data	1 KB
	GH_119_1025_0.44359_10501616264.3782	03/09/2017 14:31	MATLAB Data	226.285 KB
	GH_119_1025_0.44359_10501616264.3782A	03/09/2017 14:31	MATLAB Data	2 KB
	GH_119_1025_0.44359_10501616264.3782D	03/09/2017 14:31	MATLAB Data	2 KB

Figura 4-21: Ejemplo del contenido de la carpeta BaseDatosM.

En la Figura 4-21 podemos ver dos matrices de propagación generadas para la fibra GH que difieren en la discretización de su eje angular y sus correspondientes funciones de atenuación y difusión.

### 4.3.1 Tiempo de ejecución

Como anticipábamos al hablar sobre la necesidad de la generación de la matriz de propagación en el modelo matricial, resulta interesante comparar el tiempo de ejecución de ambos bloques ante distintas necesidades de simulación por parte del usuario. La velocidad de ejecución de nuestro bloque CCM depende fuertemente de la existencia previa de la matriz característica del modelo, por tanto en esta comparativa se analizarán casos en los que se produce variación de los cinco datos en torno a los que se define la matriz de propagación, de la distancia de simulación y del número de simulaciones que se vayan a realizar. A continuación mostramos una tabla en la que comparamos los tiempos de simulación de ambos modelos en función de varias distancias, se han utilizado los valores estándar del esquemático excepto el muestreado en  $z$  del modelo LCSIF ( $\delta_z$ ) que se ha reducido de 0.001 a 0.01 ya que en un análisis previo se observó que con este cambio se reducía el tiempo de simulación de este modelo 10 veces y la pérdida de precisión de los cálculos a la salida no resultaba apreciable. Siendo  $SI\_POF$  el tiempo asociado al bloque CCM en el caso de que la matriz ya esté creada y  $SI\_POF(1)$  en el caso de que no tenemos:

<b>Distancia (m):</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<i>LCSIF</i>	>1''	4''	19''	38''
<i>SI_POF</i>	3'	5''	7''	8''
<i>SI_POF (1)</i>	50''	63''	77''	78''

Tabla 1: Tiempos de simulación en función de la distancia de la fibra.

Para evitar confusiones es necesario aclarar que una vez que se genera la matriz de propagación, esta no se vuelve a generar al modificar la distancia aunque en la tabla podamos observar diferentes valores para  $SI\_POF(1)$ , para crear esta fila hubo que borrar la matriz de propagación para obligar a que se volviese a generar y ver como afectaba la distancia a su tiempo de generación.

Como podemos observar el bloque basado en el modelo matricial se ve muy poco afectado por la distancia de simulación. Es cierto que al aumentar la distancia se incrementa el tiempo de simulación pero su crecimiento en este sentido no es comparable con el del modelo LCSIF propio de OptSim. En estas condiciones podríamos aproximar que el tiempo necesario para resolver la ecuación de Gloge en el modelo de OptSim en función de la distancia vendría a ser 0.38 segundos/metro.

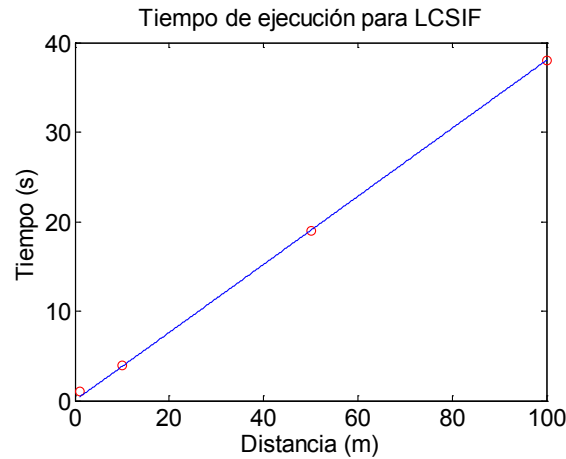


Figura 4-22: Tiempo de ejecución del modelo LCSIF en función de la distancia.

En general podríamos decir que en el caso de que se varíe la matriz de propagación para cada simulación, nuestro modelo siempre será más lento que OptSim. En caso contrario dependerá del número de simulaciones que vayan a realizar y la distancia correspondiente siendo LCSIF más penalizado conforme mayor sea cualquiera de estos dos parámetros. Esta situación aparecerá en muchos casos prácticos en los que se usen los bloques de fibra POF. En particular, en todos aquellos en los que se quiera analizar el comportamiento de un sistema basado en fibra de plástico en función de algún parámetro, como por ejemplo la potencia recibida, y para ello se ejecute un conjunto de simulaciones a través de un barrido de dicho parámetro. En concreto para una distancia alta de 100 metros con realizar 3 simulaciones nuestro modelo consigue un tiempo inferior de ejecución.

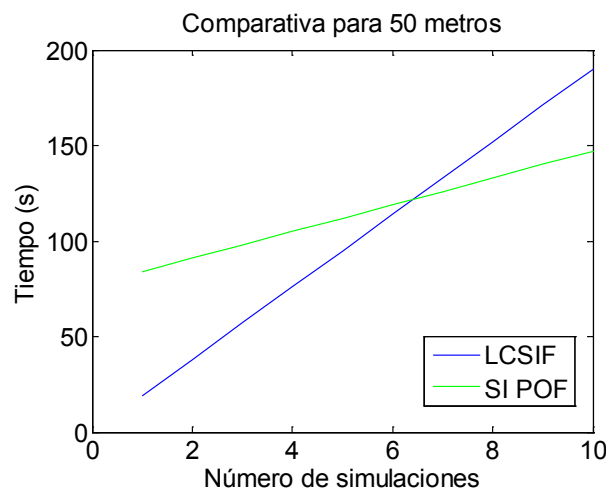


Figura 4-23: Comparativa entre los modelos LCSIF y SI\_POF para una instalación de 50 metros.

En la figura 4-23 podemos observar como SI\_POF posee un tiempo inicial debido a que necesita generar la matriz de propagación en su primera simulación, sin embargo, a medida que vamos realizando simulaciones su incremento temporal es inferior al del modelo LCSIF, consiguiendo un mejor tiempo a partir de la séptima simulación.

# Capítulo 5: Ejemplos de aplicación

En este capítulo se evaluarán las capacidades de los bloques CCM resultantes de la integración de modelos POF matriciales en el software de simulación OptSim, por medio de diferentes casos de uso. Se presentarán varios esquemáticos en los que se mezclan los modelos existentes de las librerías propias de OptSim, como láseres con capacidad de definir la forma del contenido espacial de la señal, fotodetectores o analizadores del contenido espacial de la señal a la entrada o salida de un componente, junto con los bloques creados en este proyecto que modelan diferentes tipos de fibra óptica de salto de índice y conectores. Prestaremos especial atención a los resultados observados en estos sistemas para las características de mayor interés de un sistema de comunicaciones digitales como pueden ser la respuesta frecuencial o la tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER).

## 5.1 Respuesta impulsional y frecuencial de un enlace POF

Como primer ejemplo de aplicación del trabajo de integración realizado, en esta sección vamos a obtener la respuesta impulsional y frecuencial de un enlace de comunicaciones compuesto únicamente por un tramo de fibra SI-POF. La respuesta impulsional de un sistema lineal describe su comportamiento cuando establecemos como entrada del sistema un impulso o una delta de Dirac.

### Dependencia con la longitud del enlace

El primer objetivo de este apartado es mostrar la respuesta impulsional  $h(t)$  de un enlace POF en función de su longitud mediante el uso del bloque creado para la fibra óptica de salto índice y compararla junto con el módulo de su respuesta frecuencial  $H(\omega)$  con los resultados obtenidos con el bloque LCSIF de OptSim. Para su realización se ha utilizado nuestro esquemático base de simulación que podemos encontrar en la Figura 4-1 y que nos ha servido de base en todo el desarrollo del proyecto. Establecer una delta de Dirac como entrada puede realizarse de forma sencilla modificando el parámetro `width` situado en la pestaña `Optical` del láser, el cual establece la anchura (en segundos) del pulso temporal generado, o la variable general `pulse_width_ps` (en picosegundos) de la cual toma su valor `width`, para este caso hemos reducido su valor 100 veces con respecto a su valor por defecto, obteniendo un impulso de unos 60 ps a la entrada del sistema, tal y como el mostrado en la parte izquierda de la Figura 5-1.

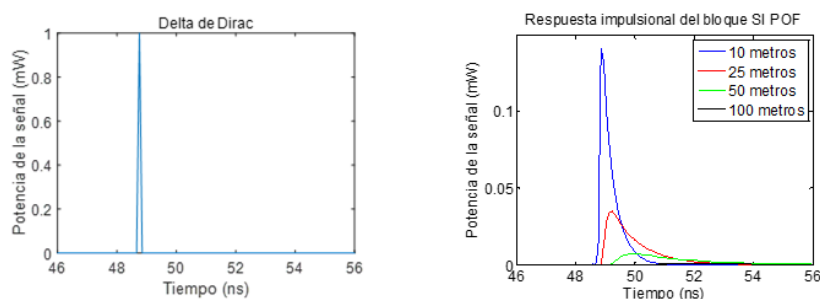


Figura 5-1: Impulso de entrada (izquierda) y respuesta impulsional del enlace POF para distintas longitudes (derecha).

Una vez generada la entrada, se han realizado simulaciones escogiendo como el tipo de fibra GH (para la cual OptSim dispone del conjunto de parámetros asociados) para las longitudes 10, 25, 50 y 100 metros y se han recopilado las señales obtenidas a la salida del bloque de fibra SI\_POF, las cuales se muestran a continuación a la derecha de la Figura 5-1.

Como era de esperar a medida que aumenta la distancia los pulsos pierden potencia (en concreto hemos obtenido unos -0.13 dB/m de atenuación). Además, encontramos respuestas impulsionales fuertemente asimétricas, con una subida rápida hasta su máximo y un decaimiento lento a partir de éste. Este fenómeno dispersivo es debido, como ya comentábamos al describir el comportamiento físico de las fibras en el Capítulo 2, a la gran cantidad de modos que se transmiten por la fibra, de manera que a medida que se produce su propagación aumenta el retardo entre los mismos debido a la presencia de dispersión modal. En concreto, para la fibra SI-POF esta diferencia de tiempos es máxima entre la potencia que se transmite por el modo fundamental y la de aquellos modos que se sitúan cerca del límite del ángulo crítico. Debido a este efecto, el pulso sufre un efecto de “esparcimiento” o ensanchamiento temporal cuya consecuencia principal consiste en una reducción del ancho de banda de la fibra a medida que este aumenta con la distancia, como veremos más adelante en esta sección. Si comparamos la respuesta impulsional de nuestro modelo con la del de OptSim para estas longitudes de simulación obtenemos los siguientes resultados:

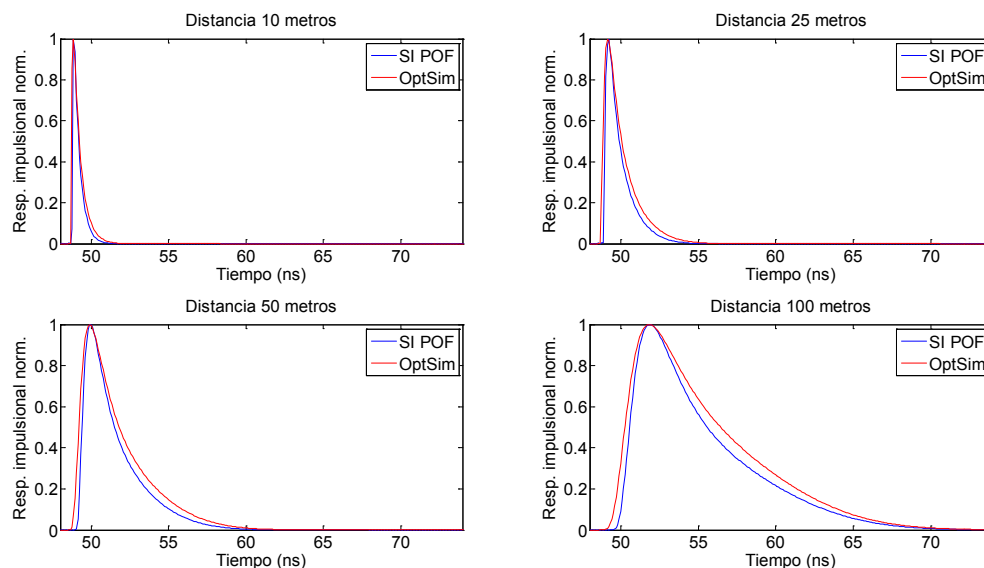


Figura 5-2: Comparación de la respuesta impulsional entre modelos para diferentes distancias.

Observando la Figura 5-2 podemos apreciar claramente el efecto de ensanchamiento del que hablábamos previamente, el cual a simple vista parece proporcional a la distancia (pasamos de 2 ns para 10 metros a 20 ns para 100 metros), acompañado de un pequeño retardo entre cada simulación. A partir de las respuestas impulsionales obtenidas, es posible obtener mediante transformada de Fourier la respuesta frecuencial  $H(\omega)$ , de la cual se representa el módulo en la Figura 5-3.

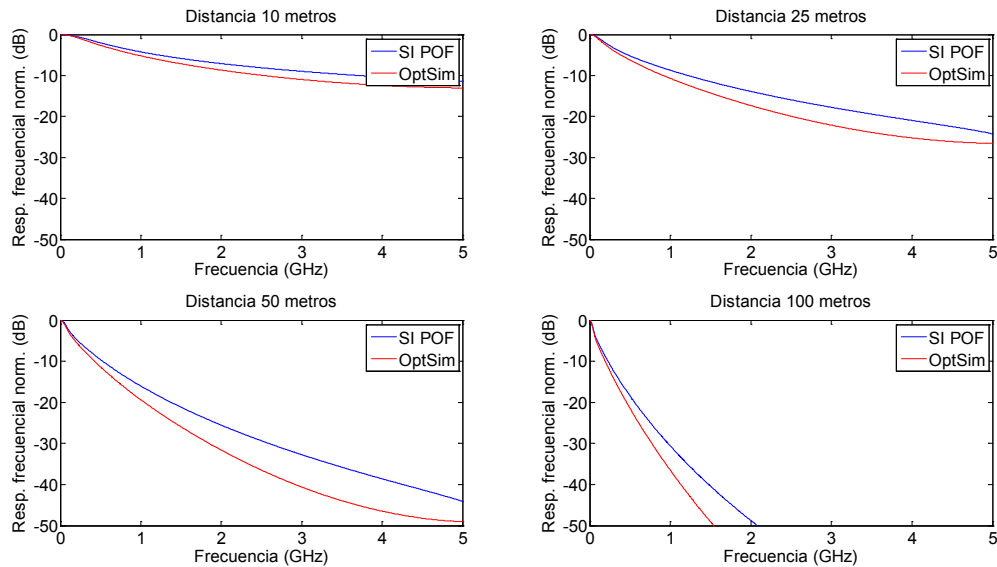


Figura 5-3: Comparación de la respuesta frecuencial entre modelos para diferentes distancias.

Como se puede apreciar en el eje de ordenadas hemos representado los datos en escala logarítmica para apreciar mejor los resultados. El ancho de banda, uno de los parámetros básicos de cualquier sistema de comunicación, se puede obtener a partir de estas gráficas observando la frecuencia para la que se obtiene una caída a 3dB. Los valores aproximados de ancho de banda de acuerdo a estas gráficas para cada longitud o distancia a cubrir por la POF son: 700 MHz para 10 m, 275 MHz para 25 m, 125 MHz para 50 m y tan solo 55 MHz para 100 m.

Comparando los resultados del bloque CCM creado en este trabajo y el del bloque OptSim, se observa que para cualquier longitud las respuestas frecuenciales obtenidas con el uso de nuestro bloque tienen mayor ancho de banda. Esto debe ser debido a la forma como ambos bloques resuelven la ecuación de flujo de Gloge, las condiciones de contorno que usan... en concreto, los valores de nuestro modelo son más acordes con medidas experimentales de este parámetro [ref] losadaPOF08

### **Dependencia con la apertura numérica de inyección**

Además de la distancia, otro parámetro que afecta de forma decisiva a la respuesta frecuencial o ancho de banda de un enlace basado en POF es la apertura numérica de la fuente. El impacto de este parámetro es particularmente mayor para fibras cortas, en las que se está lejos de alcanzar la distribución modal de equilibrio.

Para evaluar el efecto de las condiciones de inyección sobre el enlace, se ha empleado el mismo esquemático que anteriormente sólo que en este caso se ha modificado el valor de la variable global  $\tau_{x\_NA}$ , que a su vez modifica el parámetro de la fuente  $x_{iRo}$ , tal y como se describió en el apartado 4.1.1. De la misma forma, se ha obtenido la respuesta al impulso introduciendo un pulso temporal muy estrecho a la fibra y mediante la transformada de Fourier se ha obtenido la respuesta frecuencial del enlace, cuyo módulo se muestra en la Figura 5-4 para los distintos valores de  $\tau_{x\_NA}$  considerados.

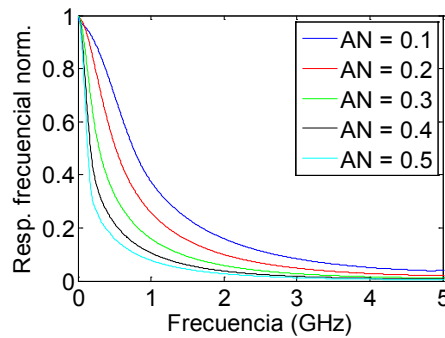


Figura 5-4: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida al variar las condiciones de inyección a una fibra de 20 m.

Los resultados muestran que para una fibra de 20 m, el ancho de banda del enlace disminuye notablemente al aumentar la apertura numérica de inyección. Esto es debido a que cuanto mayor sea la AN de la fuente, más ancha es la distribución espacial de potencia óptica a la entrada de la fibra. Dicho de otra forma, a la entrada de la fibra hay más potencia presente en modos de propagación de órdenes altos (caracterizados por propagarse con ángulos elevados). Este hecho hace que el retardo acumulado por efecto de la dispersión modal aumente, y por tanto el ancho de banda disminuya al aumentar la AN de inyección.

En la gráfica también se incluye una medida experimental de respuesta frecuencial de un enlace de fibra. Como la figura muestra, los valores aproximados de ancho de banda resultado de la simulación son de 290 MHz si  $AN = 0.3$  y 520 MHz si  $AN = 0.2$ , que se asemejan a los obtenidos de forma experimental bajo condiciones de inyección similares [ref MateoPOF05].

## 5.2 Prestaciones de un enlace POF de comunicaciones digitales

En este apartado, se va a analizar el potencial del bloque CCM creado como herramienta, junto con otros bloques de OptSim, para evaluar la viabilidad o las prestaciones de un enlace de comunicaciones digitales basado en fibra óptica de plástico. Como es habitual en estos entornos, la calidad de la transmisión o prestaciones del sistema se medirán en términos de tasa de error de bit (BER), mientras que la exploración del diagrama de ojo también resultará útil para analizar los efectos sobre la señal en recepción. La Figura 5-5 muestra el esquemático que se empleará en este apartado.

### Enlace POF de comunicaciones digitales

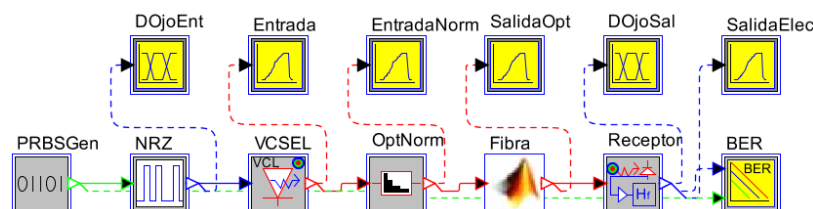


Figura 5-5: Esquemático OptSim para la evaluación de prestaciones de un enlace POF de comunicaciones digitales.

El esquemático está basado en una fuente óptica tipo VCSEL con capacidad de introducir información espacial de la luz emitida. Esta fuente es modulada directamente mediante un *driver*



eléctrico que introduce una codificación NRZ binaria según un patrón pseudoaleatorio de bits. Esta señal óptica codificada NRZ es transmitida a través de un enlace de una cierta longitud a cuya salida es recibida mediante un receptor óptico básico, compuesto por un fotodetector, un amplificador de transimpedancia y un filtro eléctrico. La salida de dicho receptor es posteriormente analizada mediante sendos bloques de estimación de BER y representación del diagrama de ojo. Es importante notar que es posible utilizar a lo largo de la cadena de transmisión tantos bloques de análisis y representación como deseemos, tanto para la señal en el dominio del tiempo como para la distribución angular de la señal. Existe un bloque adicional (*OptNorm*) a la entrada de la fibra que permite controlar la potencia óptica inyectada en la misma y que se ha incluido a efectos prácticos.

### **Efecto de la tasa de transmisión de la señal NRZ**

A partir del esquemático anterior, se ha evaluado el efecto sobre las prestaciones del enlace de la tasa o velocidad de transmisión de la señal digital. Para ello, se ha fijado la longitud del enlace a 20 metros y la potencia inyectada a la fibra a -20 dBm. La Figura 5-6 muestra los diagramas de ojo para las cuatro tasas de transmisión analizadas junto con los valores de BER obtenido para cada una de ellas.

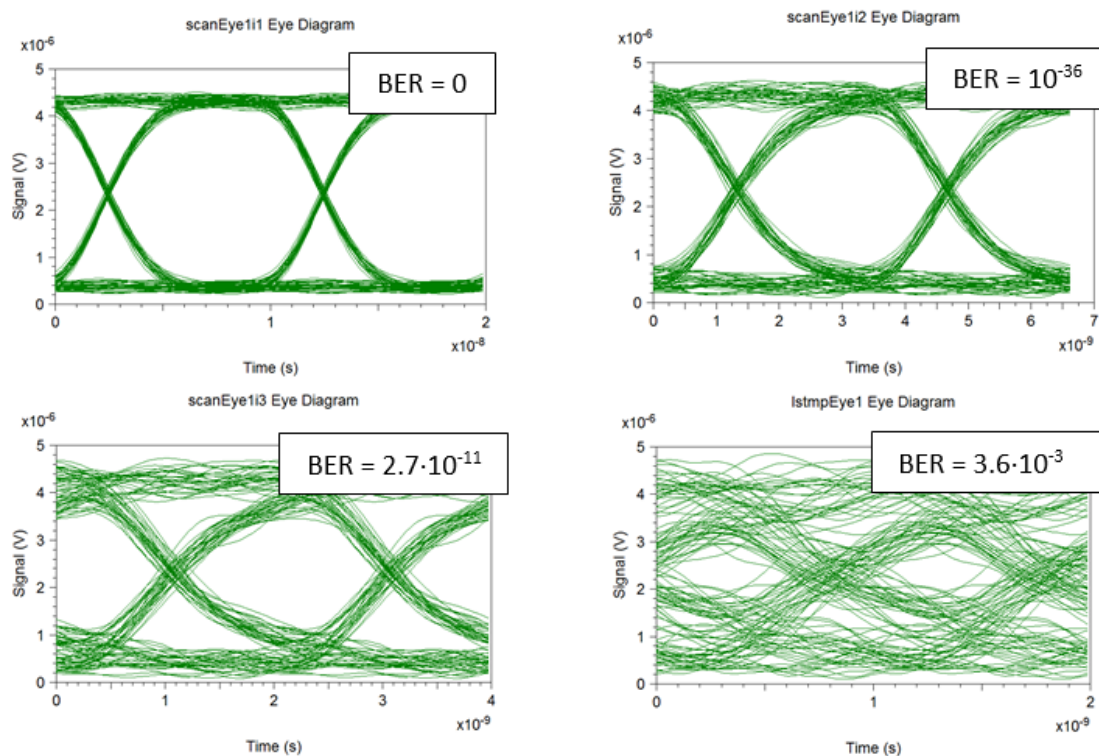


Figura 5-6: Diagramas de ojo y valores de BER para un enlace de 20 m de fibra GH con tasas de transmisión de 100 Mb/s, 300 Mb/s, 500 Mb/s y 1 Gb/s.

Como se puede observar de los resultados de simulación, aún para un enlace relativamente corto de 20 m, cuando la potencia está comprometida la tasa de transmisión que la POF es capaz de soportar disminuye rápidamente debido al efecto conjunto de degradación de prestaciones por potencia y por ancho de banda.

### **Efecto de la potencia inyectada en la fibra y la longitud del enlace**

Con el fin de observar de forma conjunta el efecto combinado de algunos de los parámetros implicados en la calidad de la comunicación del enlace digital, se propuso analizar el BER en función de dos de ellos. En concreto, a continuación se muestran resultados cuando varían tanto la potencia inyectada como la longitud de la fibra para una tasa de transmisión fija de 100 Mb/s. La Figura 5-7 muestra las curvas de BER en escala logarítmica para facilitar la visualización de sus valores.

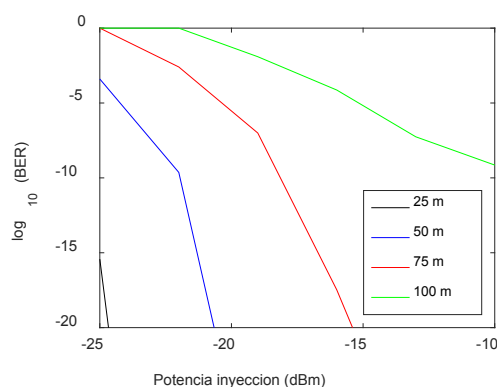


Figura 5-7: Evolución del BER frente a la potencia óptica en inyección para un enlace POF con tasa de transmisión 100 Mb/s

Los resultados muestran la enorme variabilidad de prestaciones al variar la longitud del enlace. Así, para enlaces relativamente cortos es posible transmitir datos a 100 Mb/s sin problemas aunque la potencia disponible sea escasa. Por el contrario, al aumentar la longitud de la fibra, independientemente de la potencia que tengamos disponible en el extremo transmisor la calidad del enlace no es capaz de estar por encima de un cierto límite. Este efecto es patente al observar la curva de BER correspondiente a un enlace de 100 m de fibra, que presenta una forma mucho más tendida (con menor pendiente y por tanto capacidad de mejora) frente a la potencia óptica de inyección. Este comportamiento es debido a que en este caso el efecto predominante que limita la calidad del enlace es su reducido ancho de banda.

### **5.3 Evaluación del impacto de la posición de los conectores**

Por último, en este apartado vamos a analizar el comportamiento de un enlace POF más realista mediante un esquemático que hace uso tanto del bloque CCM que modela de forma matricial a la SI-POF, como el bloque creado para el conector. La Figura 5-8 muestra el esquemático OptSim que modela un enlace de comunicaciones compuesto por dos tramos de fibra de plástico GH cuyas terminaciones no están pulidas unidos por un conector VersaLink.

## Impacto de la posición de los conectores

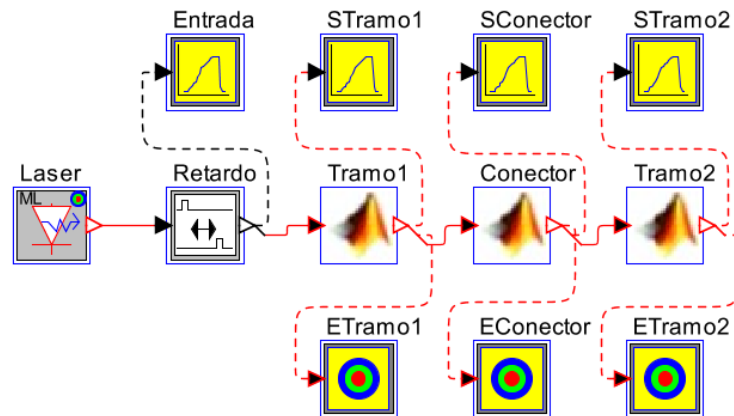


Figura 5-8: Evolución del BER frente a la potencia óptica en inyección para un enlace POF con tasa de transmisión 100 Mb/s

Existen muchos grados de libertad para configurar este esquemático, y son muy variados los estudios que se pueden realizar sobre él (efecto de los desalineamientos, del pulido del conector, del tipo de conector...). En este caso nos vamos a centrar en el estudio del efecto que la posición del conector en el enlace tiene sobre las características de transmisión del mismo, en concreto sobre su respuesta frecuencial.

Como ya se describió en el apartado 4.2.2, los conectores representan disturbancias localizadas sobre la señal óptica que atraviesa el enlace, por tanto no introducen ningún efecto temporal (frecuencial) sobre dicha señal. Por ello, a diferencia del caso de la fibra, según el modelo matricial los conectores se pueden describir mediante una única matriz característica, sin tener en cuenta la dimensión frecuencial. Sin embargo, la introducción de conectores en un enlace de comunicaciones basado en POF introduce modificaciones sobre la distribución espacial de la señal óptica que los atraviesan y esas modificaciones hacen que al final las características frecuenciales del enlace se vean afectadas.

En este apartado nos vamos a centrar en un caso simple pero muy ilustrativo del efecto de los conectores en un enlace de fibra de plástico. Vamos a configurar los parámetros del esquemático de la Figura 5-8 de forma que la longitud del enlace total tenga un valor fijo, en nuestro ejemplo 20 metros. Para analizar el efecto de la posición del conector vamos a comparar dos situaciones, en la primera, el conector está cerca del extremo receptor. Es decir, el primer tramo de fibra tiene 19.5 m de longitud mientras que el segundo tiene 0.5 m. La segunda situación consistirá en ubicar el conector de forma análoga pero esta vez cerca del extremo transmisor. La Figura 5-9 muestra los resultados de respuesta frecuencial para las dos situaciones consideradas.

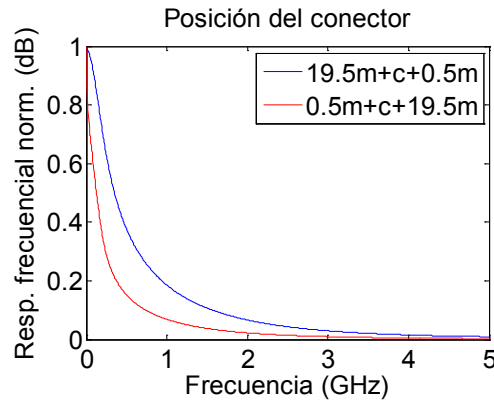


Figura 5-9: Respuesta frecuencial normalizada en función de la posición del conector en un enlace de 20 m.

Como se puede observar, si bien la longitud total del enlace es la misma en ambos casos, la situación del conector dentro del enlace hace que se produzcan cambios notables sobre su respuesta frecuencial. Así, para el caso considerado, se obtienen variaciones del ancho de banda a 3 dB que van desde 350 MHz en el mejor de los casos hasta 125 MHz en el peor. Teniendo en cuenta que el ancho de banda de un enlace de 20 m de POF sin conectores, obtenida de la misma forma que en el apartado 5.1.1, es de 570 MHz podemos concluir que la presencia de un conector en el enlace reduce de forma notable el ancho de banda del mismo. Este efecto degradante es mucho más destacado cuando el conector se sitúa cerca del emisor. En este caso, el actúa como mezclador de modos y por tanto es equivalente a introducir en el enlace una distribución modal más ancha que la de una fuente convencional para POF, lo cual reduce el ancho de banda.

# Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras

---

En el capítulo final quedan expuestas las conclusiones que se pueden extraer de la realización de este proyecto, la valoración de los objetivos cumplidos y se establecen las líneas futuras de trabajo. Por último queda finalizado con una valoración personal de la experiencia adquirida en su realización.

## 6.1 Conclusiones

Este trabajo comenzó como primer paso con el aprendizaje sobre los principales aspectos de las fibras ópticas de plástico y el modelo desarrollado por el grupo de trabajo en el que se ha realizado este proyecto, y como segundo paso con la familiarización en el manejo del software OptSim y un entendimiento más profundo de algunos de sus modelos y mecánicas específicas. Una vez obtenidos estos conocimientos se procedió a cumplir el objetivo de realizar la integración del modelo matricial en el entorno OptSim, con el propósito de obtener una librería con los componentes habituales usados en enlaces POF, y aprovechando así el desarrollo y la continua actualización de los bloques ópticos como fuentes, moduladores o receptores, junto los modelos comerciales incluidos en el mismo, permitiéndonos realizar simulaciones a nivel de sistema de distintos esquemáticos en los se ha mejorado la metodología de dos pasos actual, pudiendo acceder a las características espacio-temporales en cualquier punto del sistema.

Para ello se han desarrollado la programación de un bloque en OptSim que invoca a un archivo desarrollado en Matlab, por cada modelo de componente que ha sido incluido en la librería. Estando formado dicho archivo tanto por las funciones de compatibilidad necesarias para realizar la integración, cuyo desarrollo ha constituido la mayor parte de trabajo de este proyecto, como por el modelo matricial correspondiente al componente en cuestión.

La última parte ha consistido en la ejecución de diversas simulaciones en las que a través de la variación de parámetros como la distancia de simulación, la potencia de transmisión o la tasa de bit y el análisis de sus resultados como el BER, el diagrama de ojo o su respuesta frecuencial, han permitido comprobar algunas de las prestaciones del modelo de POF, así como compararlo con el desarrollado por OptSim y en definitiva, han demostrado el correcto funcionamiento de los bloques diseñados y el éxito de la integración realizada.

## 6.2 Posibilidades de continuación y mejora del trabajo

En este trabajo se han desarrollado las herramientas necesarias para realizar la integración del modelo matricial en el entorno OptSim, aunque debido a las limitaciones temporales en las que se ha desarrollado, la librería generada sólo consta del modelo para fibra y para los conectores. Utilizando estas herramientas se podría aumentar esta librería integrando el resto de modelos actuales y aquellos que creen el futuro dentro del grupo GTF, obteniendo así una herramienta

completa que pueda ser utilizada tanto en el ámbito académico de investigación como en la obtención de resultados previos de cara a implementaciones físicas de enlaces POF.

También se podrían aumentar sus funcionalidades como por ejemplo mostrando como resultados las pérdidas y los retardos introducidos por cada bloque o una representación extra de la información espacial de la señal.

Ya que la realización de este proyecto se ha realizado de forma íntegra a través de la programación de sus diferentes componentes y de simulaciones software, se podría analizar su comportamiento con respecto a distribuciones físicas reales, evaluando la precisión o similitud de la herramienta de simulación con el mundo real.

Por otro lado, esta herramienta de simulación nos abre un abanico de posibilidades para futuras líneas de trabajo, unir las ventajas de caracterización para las señales del modelo matricial con el rico entorno de bloques ópticos desarrollados por OptSim, puede utilizarse por ejemplo para evaluar diversas técnicas de transmisión, precodificación, ecualización o corrección de errores entre otros, en los sistemas POF.

### 6.3 Valoración del proyecto

Desde el comienzo del proyecto con la adquisición de diversos conocimientos de las fibras ópticas, el estudio del modelo matricial o la forma de transmisión de la información espacial de las señales, hasta la implementación de los modelos existentes en un entorno comercial real y la comprobación del trabajo realizado mediante la ejecución de diversos escenarios de simulación, la realización de este proyecto ha resultado en un trabajo consistente por sí mismo.

Este proyecto surge como respuesta a una necesidad existente en un mundo cada vez más digital, en concreto, la capacidad de pre-evaluar las prestaciones para un medio de transmisión específico, mediante herramientas de simulación antes de su realización física. Y comienza una vez que por medio del software OptSim y el modelo matricial, existen las herramientas para su resolución. De forma que el camino recorrido para su desarrollo, empezó con un acopio de conocimientos de sus temas relacionados, un proceso de aclimatación con los entornos en uso y un enfrentamiento de desiguales pendientes de dificultad con los problemas que en su avance se iban generando, para terminar con la resolución del objetivo de partida y como colofón un uso práctico de la herramienta generada.

Por todo esto la ejecución de este trabajo me ha generado un crecimiento personal mayor del que esperaba, cerrando un periodo repleto de formación con la confrontación de un problema práctico con un comienzo y final bien definidos, en el que la utilización de muchos de los conceptos aprendidos durante la carrera como herramientas propias, ha sido la clave para llegar alcanzar la solución del trabajo planteado. Me ha parecido un último paso muy adecuado tanto para cerrar una etapa, como para afrontar las que se planteen a continuación, que además me ha permitido profundizar y ampliar un tema que siempre me resulto interesante como es la fibra óptica de plástico y alcanzar la satisfacción de ver una aplicación muy de cerca de lo que he aprendido estos últimos años. Como conclusión, me siento orgulloso y realizado con el trabajo desarrollado y su resultado.



# Bibliografía

---

- [1] Saleh B.E.A., Teich M.C., "Fundamentals of photonics" (Wiley, 1991)(ISBN 0471839655)(T)(982s)
- [2] U. H. P. Fischer, M. Haupt and M. Joncic, "Optical Transmission Systems Using Polymeric Fibers", *In Tech Review* (2011).
- [3] Joseba Zubia, Jon Arrue, "Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications" (ETSI de Bilbao, 2000)
- [4] Hans Poisel, Olaf Ziemann, "What are POF" (High-Tech-Offensive Bayern, 2005)
- [5] "Optical and Microwave Data Transmission Systems for Last Mile, Fiber to the Home GTTH, In-hous-Networks, LAN-and MAN-Applications"
- [6] Alicia López, M. Ángeles Losada, Javier Mateo. "Simulation Framework for POF-based Communication Systems". Photonic Technologies Group, i3A University of Zaragoza, Spain
- [7] Mateo, M.A. Losada, J. Zubia, "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation", *Optics Express* 17(4), 2850-2860 (2009)
- [8] J. Mateo, M.A. Losada, I. Garcés, "Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers", *Opt. Express* vol. 14, no. 20, pp. 9028-9035 (2006)
- [9] Optical Solutions Group, "Optsim User Guide", Ossining, NY 10562, (2016)
- [10] J. Mateo, M. A. Losada, and J. Zubia, "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation," *Optics Express*, vol. 17, no. 4, pp. 2850-2860, (February 2009)
- [11] Optical Solutions Group, "Optsim Models Reference Volumen II Block Modea", Ossining, NY 10562, (2017)
- [12] Pau GALLES, "<https://es.mathworks.com/matlabcentral/answers/69071-creating-a-solid-surface-of-revolution-from-discrete-data>", MATLAB Answers (2016)
- [13] T. Kaino, "Polymer optical fibers," in *Polymers for Lightwave and Integrated Optics*. Dekker, New York, 1992; E. Nihei, T. Ishigure, N. Tanio, and Y. Koike "Present prospect of graded index plastic optical fiber in telecommunications," *IEICE Trans. Electron*, vol. E-80-c, 117\_122 (1997)
- [14] Boston Optical Fiber, Raytela Polymer Optical Fiber Cord, Toray Industries, "OptiMega and OptiGiga," 2000.
- [15] L. Blyler, "Material Science and Technology for POF," in *Proc. Eighth Conference on Plastic Optical Fibers and Applications\_POF'99*, Chiba (Japan), pp. 196\_200, 1999.
- [16] H. Guerrero, G. V. Guinea, and J. Zoido, "Mechanical properties of polycarbonate optical fibers," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 17, 231 (1998)
- [17] J. Arrue, J. Zubia, G. Fuster, and D. Kalymnios, "Light power behavior when bending plastic optical fibers," *IEE Proceedings-Optoelectronics*, vol. 145, no. 6, 313 (1998)



- [18] J. Zubia, J. Arrue, and A. Mendioroz, "Theoretical analysis of the torsion induced optical effect in plastic optical fibers," *Opt. Fiber Technol.*, no. 3, 162 (1997)
- [19] Asahi Glass Industries, Ltd., *Plastic Optical Fibers for High-Speed Transmission*, Technical Bulletin (Luminous NC-1000, NMC-1000, PMC-1000)
- [20] Information Gatekeepers, Plastic optical fiber POF data book, pp. 47\_49, 1993.
- [21] M. Naritomi, "CYTOP\_ Amorphous Fluoropolymers for low loss POF," in *POF Asia Pacific Forum 1996*, Tokyo (Japan), 1996.
- [22] H. Guerrero, J. Zoido, J. L. Escudero, and E. Bernabeu, "Characterization and sensor applications of polycarbonate optical fibers," in *Proc. Second International Conference on Plastic Optical Fibres and Applications\_POF'93*, The Hague (Holland), pp. 166\_170, 1993.
- [23] W. Daum, A. Hoffman, and U. Strecker, "Influence of chemicals on the durability of polymer optical fibers," in *Proc. Third International Conference on Plastic Optical Fibres and Applications\_POF'94*, Yokohama (Japan), pp. 111\_114, 1994.

# Índice de figuras

---

Figura 2-1: Evolución de la atenuación en fibras POF en función del material que forma el núcleo. [5]	5
Figura 2-2: Estructura de una POF. ....	5
Figura 2-3: Clasificación de los mecanismos de pérdidas que contribuyen a la atenuación de la fibra. [13] .....	6
Figura 2-4: Trayectorias del rayo más lento y más rápido en una SI-POF. [5] .....	6
Figura 2-5: Definición de la apertura numérica en una SI-POF [5]. ....	7
Figura 2-6: Interés de las ventajas de POF para cada sector. [6] .....	12
Figura 2-7: Soluciones en aviones: (a) Solución de cobre tradicional, (b) Solución emergente de fibra óptica. ....	12
Figura 2-8: Comparación de tecnologías de comunicación para entorno doméstico [4].....	14
Figura 2-9: Cálculo de una distribución angular de potencia a una distancia $z_2$ a partir de una distribución de potencia conocida a una distancia $z_1$ usando la matriz de propagación. ....	15
Figura 2-10: Ejemplo de la evaluación de un enlace POF con el método matricial. ....	17
Figura 3-1: Estructura de datos de entrada en el caso de un sólo nodo. ....	21
Figura 3-2: Ejemplo de la estructura del campo Señal definido en un nodo del componente. ....	22
Figura 3-3: Propiedades espaciales del componente. ....	23
Figura 3-4: Contenido del campo SpatialX.....	23
Figura 3-5: Ejemplo de la cabecera de un archivo DTA. ....	24
Figura 3-6: Sintaxis para definir un parámetro de tipo <code>Double</code> . ....	24
Figura 3-7: Ejemplo de archivo DTA cargado en un componente CCM.....	25
Figura 3-8: Cuadro de propiedades para el modelo LCSIF.....	27
Figura 3-9: Señal de salida del modelo LCSIF.....	29
Figura 3-10: Señal única de salida del modelo LCSIF. ....	30
Figura 3-11: Rangos de valores para los parámetros de la pestaña ModeCoupling. ....	31
Figura 4-1: Entorno de simulación usado en este proyecto. ....	34
Figura 4-2: Propiedades del láser en referencia al contenido espacial. ....	34
Figura 4-3: Modos transversales del láser en función de los parámetros $x_l$ y $x_m$ .....	35
Figura 4-4: Resultados del analizador espacial a la entrada. ....	36
Figura 4-5: Tangente de un ángulo. ....	36
Figura 4-6: Corte del módulo con el eje positivo de las abscisas.....	37
Figura 4-7: Corte de la fase con el eje positivo de las abscisas.....	38
Figura 4-8: Distribución espacial de entrada en función de la AN de la fuente. ....	39
Figura 4-9: Comportamiento de la distancia entre láser y fibra en función de las variables $tx_{wo\_um}$ y $tx_{NA}$ .....	40
Figura 4-10: Ejemplo de código para la normalización.....	41
Figura 4-11: Ajuste de la señal de salida al formato adecuado. ....	41
Figura 4-12: Matriz de propagación para pulsos estrechos re-muestreados. ....	42
Figura 4-13: Panel de propiedades del componente SI_POF. ....	43
Figura 4-14: Pestaña InputCoupling.....	44

Figura 4-15: Variables globales del entorno de simulación para fibra óptica de salto de índice. ....	45
Figura 4-16: Distribución de intensidad a la salida para $d = 54.72\mu\text{m}$ y $2d = 109.44\mu\text{m}$ .....	46
Figura 4-17: Entrada-salida sin mantener los ejes en su representación .....	46
Figura 4-18: Esquemático de trabajo para el diseño del conector. ....	47
Figura 4-19: Panel de propiedades del conector. ....	47
Figura 4-20: En rojo podemos ver las muestras eliminadas debido al filtrado angular. ....	49
Figura 4-21: Ejemplo del contenido de la carpeta BaseDatosM.....	51
Figura 4-22: Tiempo de ejecución del modelo LCSIF en función de la distancia. ....	52
Figura 4-23: Comparativa entre los modelos LCSIF y SI_POF para una instalación de 50 metros. ....	52
Figura 5-1: Impulso de entrada (izquierda) y respuesta impulsional del enlace POF para distintas longitudes (derecha). ....	53
Figura 5-2: Comparación de la respuesta impulsional entre modelos para diferentes distancias.....	54
Figura 5-3: Comparación de la respuesta frecuencial entre modelos para diferentes distancias. ....	55
Figura 5-4: Comparación de la respuesta frecuencial obtenida al variar las condiciones de inyección a una fibra de 20 m. ....	56
Figura 5-5: Esquemático OptSim para la evaluación de prestaciones de un enlace POF de comunicaciones digitales. ....	56
Figura 5-6: Diagramas de ojo y valores de BER para un enlace de 20 m de fibra GH con tasas de transmisión de 100 Mb/s, 300 Mb/s, 500 Mb/s y 1 Gb/s.....	57
Figura 5-7: Evolución del BER frente a la potencia óptica en inyección para un enlace POF con tasa de transmisión 100 Mb/s.....	58
Figura 5-8: Evolución del BER frente a la potencia óptica en inyección para un enlace POF con tasa de transmisión 100 Mb/s.....	59
Figura 5-9: Respuesta frecuencial normalizada en función de la posición del conector en un enlace de 20 m. ....	60
Figura I-1: Diagrama de Gantt.....	71
Figura II-1: Formato de archivo DAT para un archivo con datos de intensidad. ....	72
Figura II-2: Archivo DTA usado para desarrollar el bloque CCM del proyecto. ....	73

# Índice de acrónimos, nomenclatura o glosario

---

**POF:** Fibra óptica de plástico

**GTF:** Grupo de Tecnologías Fotónicas

**EINA:** Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

**EMI:** Interferencias electromagnéticas

**PMMA:** Polimetil-metacritalo

**AN:** Apertura Numérica

**SI-POF:** Fibra óptica de plástico de salto de índice

**GI-POF:** Fibra óptica de plástico de índice gradual

**MSI-POF:** Fibra óptica de plástico de índice multisalto

**MC-POF:** Fibra óptica de plástico multinúcleo

**DSI-POF:** Fibra óptica de plástico de doble salto de índice

**PF-POF:** Fibras con un núcleo de 120- $\mu\text{m}$  de polímero perfluorinado.

**EMD:** Distribución de equilibrio modal

**PCS:** Fibras de cubierta de polímero

**MMF:** Fibras Multimodo

**SMF:** Fibras Monomodo

**MOST:** Sistema de Transporte Orientado a Multimedia

**ARINC:** Radio Aeronáutica INC.

**DLR:** Centro Aeroespacial de Alemania

**FTTH:** Fibra Hasta el Hogar

**HAN:** Redes de área casera

**FFP:** Patrón de campo lejano

**BER:** Tasa de error en el bit

**CCM:** Bloque de co-simulación con Matlab

**EAF:** Potencia de campo lejano contenida en un ángulo sólido

**LCSIF:** Large-Core Step-Index Fiber

**GH:** Fibra óptica de plástico ESKA PREMIER GH4001 de Mitsubishi

**HFB:** Fibra óptica de plástico HFBR-RUS100 de Agilent

**PGU:** Fibra óptica de plástico PGU-FB1000 de Torayy

**BH:** Fibra óptica de plástico BH4001 de Mitsubishi



# Anexo I: Diagrama de Gantt

---

El diagrama que muestra la evolución temporal (entre los años 2016 y 2017) de este proyecto es el siguiente:

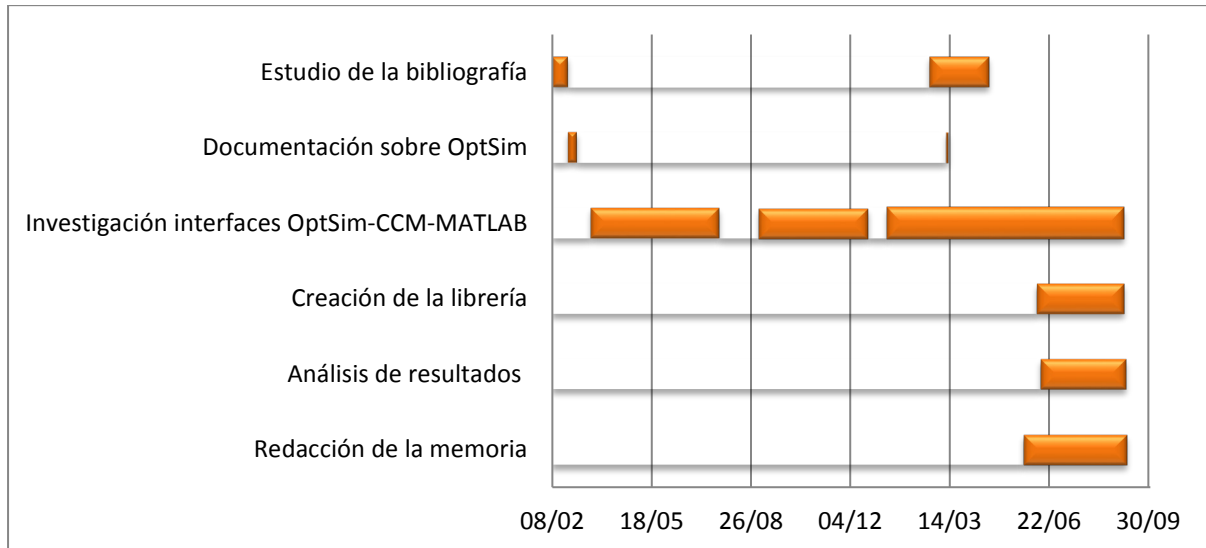


Figura I-1: Diagrama de Gantt.

# Anexo II: Formato de ficheros especificados por el usuario

---

Como hemos explicado en el Apartado 3.2.1 una de las formas de especificar al modelo de OptSim la distribución espacial de potencia inicial de la señal consiste en que el usuario la introduzca a través de un fichero. Para ello dentro de las propiedades del componente en la pestaña `InputCoupling`, debemos cambiar el valor del parámetro `input_launch` de `spatial_input` a alguno de los siguientes valores: `I_exterior_file`, `I_interior_file`, `EAF_exterior_file` o `EAF_interior_file`. Y en el parámetro `launch_file` debemos introducir la ruta del archivo correspondiente.

El archivo especificado debe ser un documento de texto con formato `.dat` en el que los datos experimentales deben estar definidos en un eje angular uniforme y con el siguiente formato:

```
FarField1DUnitlessFormat1 <angle_units>
<num_pts> <min_ang> <max_ang>
<intensity 1>
<intensity 2>
<intensity 3>
...
```

Figura II-1: Formato de archivo DAT para un archivo con datos de intensidad.

La primera línea del documento debe ser la mostrada en la Figura II-1 en el caso de seleccionar `I_exterior_file` o `I_interior_file`, es decir, si los datos introducidos corresponden a valores de intensidad. En el caso de que los datos estén referenciados a la potencia contenida en un ángulo sólido hay que cambiar este campo por `EAFFormat1`.

La unidad angular se especifica en el parámetro `<angle_units>`, pudiendo tomar como valor `[degrees]` o `[radians]`, sino se rellena se considerará por defecto `[degrees]`. El campo `<num_pts>` debe contener el número de líneas que contienen datos en el fichero, `<min_ang>` siempre debe ser 0 y `<max_angle>` contendrá el ángulo máximo. Por último los valores de intensidad no contendrán unidades y al introducirse en el modelo serán normalizados, ya que en OptSim la información de la potencia de la señal siempre está contenida en la parte temporal.

Ejemplo de un archivo DTA definido en el desarrollo de este proyecto:



```
FarField1DUnitlessFormat1 [degrees]
119 0 60
1.000000e+00
6.065307e-01
1.353353e-01
1.110900e-02
3.354626e-04
3.726653e-06
1.522998e-08
2.289735e-11
1.266417e-14
...
```

Figura II-2: Archivo DTA usado para desarrollar el bloque CCM del proyecto.

# Anexo III: Archivos DTA

---

El archivo DTA generado para integrar el modelo de fibra óptica de salto de índice del grupo GTF en el software OptSim es:

```
MatlabMutimode
MODELNAME MatlabMultiMode
ICONFILE matcosim.bmp
DLLFILE matcosimR2013a.dll
ENTRYNAMEROOT matcosim
FUNCTIONCODES E
MODELABBREV MatlabMultiMode
TOOLTIP "Demo Spatial Matlab Model - Plastic Fiber"
ICON MatlabCosimulationPlotIcon 0 0
NOTE MatlabModelName
MININPUTS 1
MAXINPUTS 1
MINOUTPUTS 1
MAXOUTPUTS 1
NUMINEQNUMOUTNODES TRUE
NUMINPUTS 1
NUMOUTPUTS 1
INSIGTYPES OpSigType
OUTSIGTYPES OpSigType
SORTEDPARAMETERS FALSE
```

```
##### General Parameters #####
```

```
PARAM MfileNameStringType
GROUP General
VALUE FiberModelPablo
ENDPARAM
```

```
PARAM length DoubleType
GROUP General
MINVALUE 0
MAXVALUE 1000
VALUE length
UNITS m
ENDPARAM
```

```
PARAM FiberTypeEnumType
GROUP General
VALUE GH
FIELD GH HFB PGU BH
ENDPARAM
```

```
PARAM SourceToFiberDistDoubleType
GROUP General
```

```
MINVALUE 0
MAXVALUE 1
VALUE 0
UNITS m
ENDPARAM
```

```
PARAM FiberToDetectorDistDoubleType
GROUP General
MINVALUE 0
MAXVALUE 1
VALUE 0
UNITS m
ENDPARAM
```

```
PARAM SameSpatialAxisEnumType
GROUP General
VALUE no
FIELD yes no
ENDPARAM
```

```
##### Input Coupling Parameters #####
```

```
PARAM input_launchEnumType
GROUP InputCoupling
VALUE spatial_input
FIELD spatial_inputI_exterior_fileI_interior_file
ENDPARAM
```

```
PARAM launch_fileFileType
GROUP InputCoupling
REQUIRES input_launch:I_exterior_file | input_launch:I_interior_file
VALUE
ENDPARAM
```

```
ENDCOMPONENT
```

El archivo DTA generado para integrar los modelos de conectores del grupo GTF en el software OptSim es:

```
MatlabConnector
MODELNAME MatlabConnetor
ICONFILE matcosim.bmp
DLLFILE matcosimR2013a.dll
ENTRYNAMEROOT matcosim
FUNCTIONCODES E
MODELABBREV MatlabConnector
TOOLTIP "Demo Spatial Matlab Model - Connector"
ICON MatlabCosimulationPlotIcon 0 0
NOTE MatlaConnector
MININPUTS 1
MAXINPUTS 1
MINOUTPUTS 1
MAXOUTPUTS 1
NUMINEQNUMOUTNODES TRUE
NUMINPUTS 1
NUMOUTPUTS 1
INSIGTYPES OpSigType
OUTSIGTYPES OpSigType
SORTEDPARAMETERS FALSE
```

```
##### General Parameters #####
```

```
PARAM MfileName StringType
GROUP General
VALUE MatlabConnector
ENDPARAM
```

```
PARAM ConnectorAprox EnumType
GROUP General
VALUE Vectorial
FIELD Vectorial Constante
ENDPARAM
```

```
PARAM ConnectorFiber EnumType
GROUP General
VALUE GH
FIELD BH GH PGU
ENDPARAM
```

```
PARAM ConnectorModel EnumType
GROUP General
VALUE VL
FIELD VL ST
ENDPARAM
```

```
PARAM Polished EnumType
GROUP General
VALUE No
FIELD Yes No
```

ENDPARAM

PARAM RadialMisalignment DoubleType

GROUP General

MINVALUE 0

MAXVALUE 10000

VALUE 0

UNITS um

ENDPARAM

PARAM LongitudinalMisalignment DoubleType

GROUP General

MINVALUE 0

MAXVALUE 10000

VALUE 0

UNITS um

ENDPARAM

ENDCOMPONENT

# Anexo IV: Obtención de la distancia a través de la anchura del haz y el radio de curvatura

---

En este anexo se incluye el desarrollo que permite obtener la expresión (4-12) vista en el Capítulo 4.1.2, mediante de las ecuaciones (4-2), (4-3), (4-5), (4-9) y (4-12) de forma que la distancia  $z$  quede en función de la constante  $m$  y la pendiente  $p$  a través de las ecuaciones (4-9) y (4-12):

$$W(z) = W_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}, W_0 = \left( \frac{\lambda \cdot z_0}{\pi} \right)^{1/2}, R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$$

$$W(z) = \left( \frac{2}{m} \right)^{1/2}, R(z) = \frac{\pi}{\lambda p}$$

$$\left. \begin{aligned} W(z) = \frac{2}{m} = \frac{\lambda z_0}{\pi} \left( 1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right) &\Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda m z_0} = 1 + \frac{z^2}{z_0^2} \Rightarrow \frac{k}{m z_0} = 1 + \frac{z^2}{z_0^2} \Rightarrow \frac{k}{m} z_0 = z_0^2 + z^2 \\ R(z) = \frac{\pi}{\lambda} p = z \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z} \right)^2 \right] &\Rightarrow \frac{\pi}{\lambda} p = z + \frac{z_0^2}{z} \Rightarrow \left( \frac{\pi}{\lambda p} - z \right) z = z_0^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{k}{m} \left( \left( \frac{\pi}{\lambda p} - z \right) z \right)^{1/2} &= \left( \frac{\pi}{\lambda p} - z \right) z + z^2 \Rightarrow \frac{k^2}{m^2} \left( \frac{\pi}{\lambda p} - z \right) z = \left( \frac{\pi}{\lambda p} z \right)^2 \Rightarrow \frac{k^2}{m^2} \frac{\pi}{\lambda p} z - \frac{k^2}{m^2} z^2 = \frac{\pi^2}{\lambda^2 p^2} z^2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{4\pi^2}{\lambda^2 m^2} \frac{\pi}{\lambda p} z = \left( \frac{\pi^2}{\lambda^2 p^2} + \frac{k^2}{m^2} \right) z^2 \Rightarrow \left( \frac{\pi^2}{\lambda^2 p^2} + \frac{k^2}{m^2} \right) z^2 - \frac{4\pi^3}{\lambda^3 m^2 p} z = 0 \end{aligned}$$

$$I) z = 0$$

$$\begin{aligned} II) \left( \frac{\pi^2}{\lambda^2 p^2} + \frac{k^2}{m^2} \right) z - \frac{4\pi^3}{\lambda^3 m^2 p} &= 0 \Rightarrow z = \frac{\frac{4\pi^3}{\lambda^3 m^2 p}}{\frac{\pi^2}{\lambda^2 p^2} + \frac{k^2}{m^2}} = \frac{\frac{4\pi^2}{\lambda^2 m^2} R}{R^2 + \frac{k^2}{m^2}} = \frac{R}{\frac{\lambda^2 m^2}{4\pi^2} R^2 + \frac{\lambda^2 m^2 k^2}{4\pi^2 m^2}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{R}{\frac{\lambda^2 m^2}{4\pi^2} R^2 + \frac{\lambda^2 4\pi^2}{4\pi^2 \lambda^2}} = \frac{R}{\frac{\lambda^2 m^2}{4\pi^2} R^2 + 1} = \frac{R}{\frac{\lambda^2}{\pi^2 W^4} R^2 + 1} \end{aligned}$$

# Anexo V: Datos de las fibras y conectores integrados

En este anexo se exponen las hojas de características de las fibras y los conectores que se han incluido en los bloques CCM y pueden ser simuladas en el entorno OptSim utilizando el método matricial desarrollado en la Universidad de Zaragoza.

## 14.1 Mitsubishi, GH 4001

### ESKA™ Premier Polyethylene Jacketed Optical Fiber Cord: GH4001

Manufactured by Mitsubishi Rayon Co., Ltd.

Marketed and sold by Mitsubishi International PolymerTrade Corporation

January 2010

Structure			Packaging	
Core Material	Polymethyl Methacrylate Resin (PMMA)		Spool Length (m)	500
Cladding Material	Fluorinated Polymer		Net weight on spool (kg)	3.0
Core Refractive Index	1.49		Spool Weight (kg)	1.2
Refractive Index Profile	Step Index		Carton Size (mm)	365 X 365 X 160
Numerical Aperture	0.5		Carton Weight (kg)	3.6
	Unit	Typical	Master Carton	5 spools
Core Diameter	μm	980	Jacket	
Cladding Diameter	μm	1,000	Color and Material	Black, Polyethylene
Jacket Diameter	mm	2.2	Indication on Jacket	ESKA PREMIER; Pink
Approximate Weight	g/m	3.7		

Performance		Criteria for Acceptance and/or [Test Conditions]	Unit	Values
Operation Temperature		No deterioration in optical properties [in a dry atmosphere]*	°C	-55 ~ 85
Operating Temperature in a Moist Atmosphere		No deterioration in optical properties [under 95% RH] **	°C	Max.75
Optical Properties	Transmission Loss [650nm Collimated Light]	[25°C 50% RH]	dB/km	Max.170
		[Operation Temperature]	dB/km	Max.190
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss increment ≤ 0.5dB [a quarter bend]	mm	Min.25
	Repeated Bending Endurance	Loss increment ≤ 1 dB [in conformity to the JIS C 6861]***	Times	Min.10,000
	Tensile Strength	[Tensile force at yield point [JIS C 6861]	N	Min.70
	Twisting Endurance	Loss increment ≤ 1 dB [sample length: 1m, Tensile Force: 4.9N]	Times	Min.5
	Impact Endurance	Loss increment ≤ 1 dB [in conformity to the JIS C 6861]	N · m	Min.0.4

Notes: Performance tested in conditions under 25°C unless otherwise indicated.

\* Attenuation increase shall be <10% after 1,000 hours.

\*\* Attenuation increase shall be <10% after 1,000 hours, except when due to absorbed water.

\*\*\* Bend Angle ±90° , Bend Radius 15mm, Tension 500g.

#### Applications

The GH-Series of single-jacketed cables are typically used as data transfer media.

The information contained herein is presented as a guide to product selection. It is subject to change without notice, and should not be regarded as a representation, warranty or guarantee with regard to the quality, characteristics or use of this product



2 Penn Plaza East, 11th Floor, Newark, NJ 07105

Please visit <http://www.fiberoptical.com/> to locate a sales representative near you.

## 14.2 Mitsubishi, BH4001

### ESKA™ Polyethylene Jacketed Optical Fiber Cord: BH4001

Manufactured by Mitsubishi Rayon Co., Ltd.  
Marketed and sold by Mitsubishi International PolymerTrade Corporation

January 2010

Structure			Packaging	
Core Material	Polymethyl Methacrylate Resin (PMMA)		Spool Length (m)	500
Cladding Material	Fluorinated Polymer		Net weight on spool (kg)	3.1
Core Refractive Index	1.49		Spool Weight (kg)	1.2
Refractive Index Profile	Step Index		Carton Size (mm)	370 X 370 X 170
Numerical Aperture	0.58		Carton Weight (kg)	3.8
	Unit	Typical	Master Carton	5 spools
Core Diameter	μm	980	Jacket	
Cladding Diameter	μm	1,000	Color and Material	Black, Cross-linked PE
Jacket Diameter	mm	2.18	Indication on Jacket	None
Approximate Weight	g/m	3.8		

Performance		Criteria for Acceptance and/or [Test Conditions]	Unit	Values
Operation Temperature		No deterioration in optical properties [in a dry atmosphere]*	°C	-55 ~ 105
Operating Temperature in a Moist Atmosphere		No deterioration in optical properties [under 95% RH]**	°C	Max.85
Optical Properties	Transmission Loss [650nm Collimated Light]	[25°C 50% RH]	dB/km	Max.200
		[Operation Temperature]	dB/km	Max.250
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment ≤ 0.5dB [a quarter bend]	mm	Min.15
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment ≤ 1 dB [in conformity to the JIS C 6861]***	Times	Min.1,000
	Tensile Strength	[Tensile force at 5% elongation; in conformity to JIS C 6861]	N	Min.70
	Twisting Endurance	Loss Increment ≤ 1 dB [sample length: 1m, Tensile Force: 4.9N]	Times	Min.5
	Impact Endurance	Loss Increment ≤ 1 dB [in conformity to the JIS C 6861]	N · m	Min.0.4

Notes: Performance tested in conditions under 25°C unless otherwise indicated.

\* Attenuation Increase shall be <10% after 1,000 hours.

\*\* Attenuation Increase shall be <10% after 1,000 hours, except when due to absorbed water.

\*\*\* Bend Angle ±1-90°, Bend Radius 15mm, Tension 500g.

#### Applications

The BH-Series of single-jacketed cables are typically used as data and sensor media for higher temperature requirements.

The information contained herein is presented as a guide to product selection. It is subject to change without notice, and should not be regarded as a representation, warranty or guarantee with regard to the quality, characteristics or use of this product



2 Penn Plaza East, 11th Floor, Newark, NJ 07105

Please visit <http://www.fiber opticpof.com/> to locate a sales representative near you.



## 14.3 Agilent, HFBR-RUS100

**HFBR-RXXXX Series (POF)**  
**HFBR-EXXXXX Series (POF)**  
 Plastic Optical Fiber Cable and Accessories  
 for Versatile Link

### Data Sheet

**AVAGO**  
 TECHNOLOGIES



#### Cable Description

The HFBR-R/EXXXXX series of plastic fiber optic cables are constructed of a single step-index fiber sheathed in a black polyethylene jacket. The duplex fiber consists of two simplex fibers joined with a zipcord web.

Standard attenuation and extra low loss POF cables are identical except for attenuation specifications.

Polyethylene jackets on all plastic fiber cables comply with UL VW-1 flame retardant specification (UL file # E89328).

Cables are available in unconnected or connected options. Refer to the Ordering Guide for part number information.

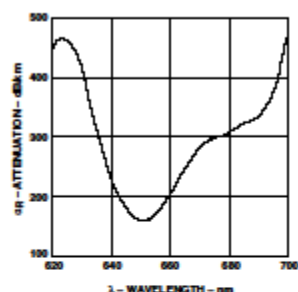


Figure 1. Typical POF attenuation vs. wavelength.

#### Features

- Compatible with Avago Versatile Link Family of connectors and fiber optic components
- 1 mm diameter Plastic Optical Fiber (POF) in two grades: low cost standard POF with 0.22 dB/m typical attenuation, or high performance extra low loss POF with 0.19 dB/m typical attenuation

#### Applications

- Industrial data links for factory automation and plant control
- Intra-system links; board-to-board, rack-to-rack
- Telecommunications switching systems
- Computer-to-peripheral data links, PC bus extension
- Proprietary LANs
- Digitized video
- Medical instruments
- Reduction of lightning and voltage transient susceptibility
- High voltage isolation

**Plastic Optical Fiber Specifications: HFBR-R/EXXYYY**

**Absolute Maximum Ratings**

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit	Note
Storage and Operating Temperature	$T_{SO}$	-55	+85	°C	
Recommended Operating Temperature	$T_O$	-40	+85	°C	
Installation Temperature	$T_I$	-20	+70	°C	1
Short Term Tensile Force	Single Channel	$F_T$	50	N	2
	Dual Channel	$F_T$	100	N	
Short Term Bend Radius	$r$	25		mm	3, 4
Long Term Bend Radius	$r$	35		mm	
Long Term Tensile Load	$F_T$		1	N	
Flexing			1000	Cycles	4

**Mechanical/Optical Characteristics,  $T_A = -40$  to  $+85^\circ\text{C}$  unless otherwise specified.**

Parameter	Symbol	Min.	Typ. <sup>[5]</sup>	Max.	Unit	Condition
Cable Attenuation	Standard Cable, Type "R"	$\alpha_O$	0.15	0.22	0.27	dB/m Source is HFBR-15XX (660 nm LED, 0.5 NA)
	Extra Low Loss, Type "E"		0.15	0.19	0.23	$L = 50$ meters
Reference Attenuation	Standard Cable, Type "R"	$\alpha_R$	0.12	0.19	0.24	dB/m Source is 650 nm, 0.5 NA monochromator,
	Extra Low Loss, Type "E"		0.12	0.16	0.19	$L = 50$ meters Note 7, Figure 1
Numerical Aperture	NA	0.46	0.47	0.50		>2 meters
Diameter, Core and Cladding	$D_C$	0.94	1.00	1.06	mm	
Diameter, Jacket	$D_J$	2.13	2.20	2.27	mm	Simplex Cable
Propagation Delay Constant	$l/v$		5.0		ns/m	Note 6
Mass per Unit Length/Channel			5.3		g/m	Without Connectors
Cable Leakage Current	$I_L$		12		nA	50 kV, $L = 0.3$ meters
Refractive Index	Core	$n$	1.492			
	Cladding		1.417			

**Notes:**

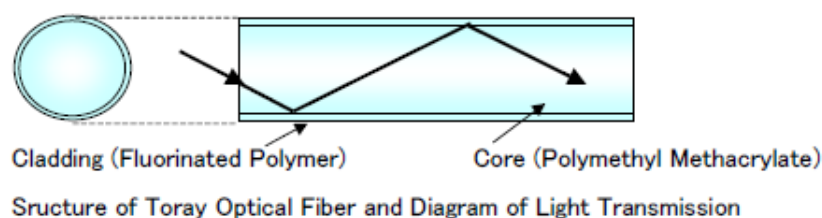
1. Installation temperature is the range over which the cable can be bent and pulled without damage. Below  $-20^\circ\text{C}$  the cable becomes brittle and should not be subjected to mechanical stress.
2. Short Term Tensile Force is for less than 30 minutes.
3. Short Term Bend Radius is for less than 1 hour nonoperating.
4.  $90^\circ$  bend on 25 mm radius mandrel. Bend radius is the radius of the mandrel around which the cable is bent.
5. Typical data are at  $25^\circ\text{C}$ .
6. Propagation delay constant is the reciprocal of the group velocity for propagation delay of optical power. Group velocity is  $v=c/n$  where  $c$  is the velocity of light in free space ( $3 \times 10^8$  m/s) and  $n$  is the effective core index of refraction.
7. Note that  $\alpha_R$  rises at the rate of about 0.0067 dB/°C, where the thermal rise refers to the LED temperature changes above  $25^\circ\text{C}$ . Please refer to Figure 1 which shows the typical plastic optical fiber attenuation versus wavelength at  $25^\circ\text{C}$ .

## 14.4 Toray, PGU-FB1000

Toray polymer optical fibers have been developed by Toray Industries, Inc., based on its experience in polymer and fiber manufacturing as a leading producer of synthetic fibers and plastic products in the world.

Our optical fiber is step index type with core of high-purity polymethyl methacrylate and cladding of special fluorinated polymer.

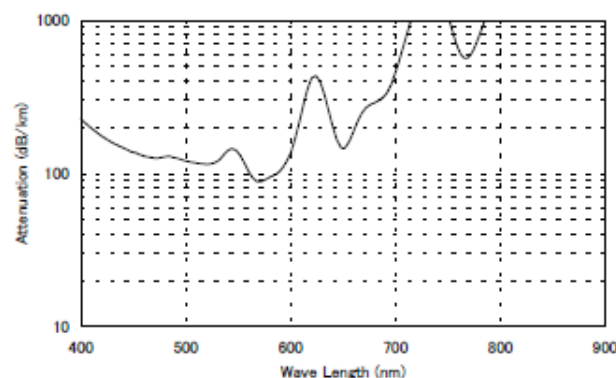
We have six types of optical fiber, of which brief descriptions are given in the following table. Our optical fiber and its fabricated products are divided into three grades according to the attenuation.



Fiber Series (\*\*Values in the table are for reference, and can vary based on the conditions and environment of use)

Series	PG	PF	PJ	PM
Parameter	Performance			
Material	Polymethyl Methacrylate (PMMA)			
Core	Fluorinated Polymer			
Cladding	Step Index			
Refractive index profile	Step Index			
Numerical aperture	0.50	0.46	0.63	0.32
Angle of incidence	60°	55°	78°	37°
Temperature range of use	-55~70°C	-55~85°C	-55~85°C	-55~85°C
Main Usages	Communication Light Guide Optical Sensor Displays	Communication	Communication Light Guide Optical Sensor	High Speed Data Transmission

Spectral Attenuation of Optical Fiber (Typical Data)

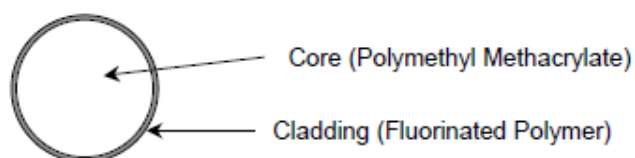


Germany and other countries: LASER COMPONENTS GmbH, Phone: +49 8142 2864 0, Fax: +49 8142 2864 11, info@lasercomponents.com  
Great Britain: LASER COMPONENTS (UK) Ltd., Phone: +44 1245 491 499, Fax: +44 1245 491 801, info@lasercomponents.co.uk

## **TORAY RAYTELA®**

### — PF series —

#### 1. Structure



#### 2. Specifications

Parameter		Performance
Core	Material	Polymethyl Methacrylate (PMMA)
	Refractive index	1.49
Cladding	Material	Fluorinated Polymer
	Refractive index	1.42
Refractive index profile		Step index
Numerical aperture		0.46
Angle of incidence		55°
Temperature range of use		-55~85°C

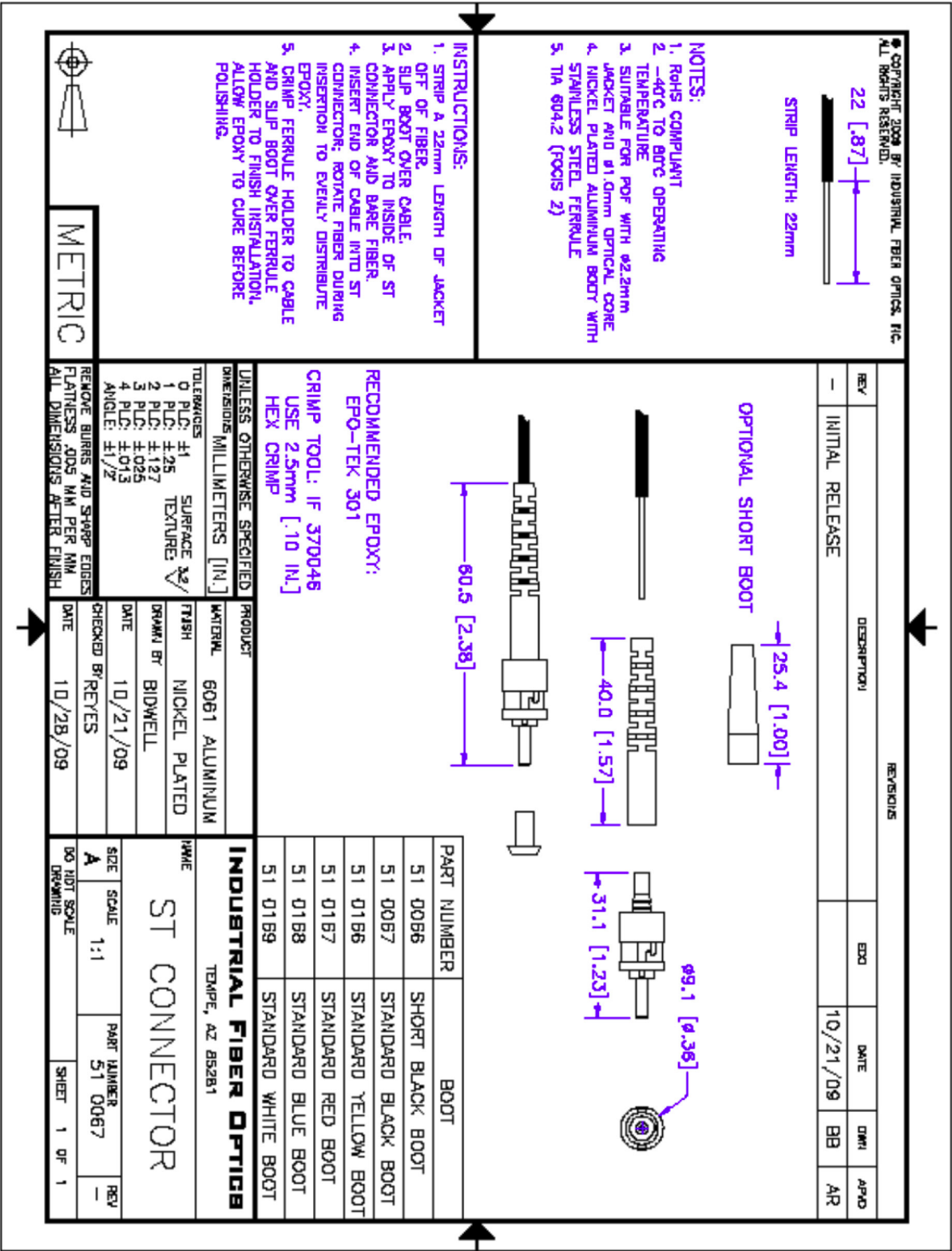
#### 3. Fiber Product List

Product Code	Core Diameter (μm)	Cladding Diameter (μm)	Length on Spool (m/spool)	Attenuation at 650nm (dB/m)
PFU-FB 500	486	500	6,000	≤ 0.18
PFU-FB 750	735	750	2,700	≤ 0.15
PFU-FB1000	980	1,000	1,500 5,250	≤ 0.15



Germany and other countries: LASER COMPONENTS GmbH, Phone: +49 8142 2864 0, Fax: +49 8142 2864 11, info@lasercomponents.com  
 Great Britain: LASER COMPONENTS (UK) Ltd., Phone: +44 1245 491 499, Fax: +44 1245 491 801, info@lasercomponents.co.uk

14.5 Conector ST



## 14.6 Conector VersaLink

### **VL/VL Industrial POF Fiber Patch Cords**

**Latching connectors, 1.0 mm core, UL-rated 2.2 mm jacket - GHCP4001**



Industrial Fiber Optics manufactures standard product lines of fiber optic patch cords with plastic optical fiber (POF) and Versatile Link (VersaLink) terminations. These products provide ready-made solutions for quick installations in commercial or industrial networking/communications applications using Avago VersaLink fiber optic transmitters and receivers. Our premier quality patch cords are available in simplex and duplex cable with latching and non-latching connectors, heavy-duty or UL-rated cable construction and in many standard lengths.

This patch cord line utilizes high-quality ESKA® Premier GHCP4001 fiber cable featuring a rugged polyethylene jacket. Patch cord terminations are authentic Avago VersaLink connectors.

These cables either meet or exceed the technical specifications of patch cords made by Avago or other contract manufacturers.

#### **Features**

- ◆ Simplex, duplex, latching and non-latching connector options
- ◆ UL-rated fiber cable and connections
- ◆ Crimped and epoxied connector terminations for maximum retention strength
- ◆ 1  $\mu\text{m}$  polish terminations ensure high optical coupling efficiency
- ◆ Assembly processes exceed Avago recommended procedures

# Anexo VI: Códigos para la integración del modelo

---

A continuación se muestra el código de los archivos desarrollados en Matlab que permiten la integración del modelo matricial de la fibra de salto de índice como de los conectores. Comenzando por el archivo “FiberModelPablo.m” que corresponde a la fibra óptica:

```
% Desarrollado por Pablo Martínez Gómez

%-----%
% Obtención de datos y Conversion de metros a °
%-----%

OutNode{1} = InNode{1};
format long
x = InNode{1};
set(0, 'DefaultFigureCloseRequestFcn', @my_closereq)
figure(1)

n_core=1.492;    % Core refractive index for PMMA POFs
nco_GH = 1.492;
nco_HFB = 1.492;
nco_PGU = 1.492;
nco_BH = 1.492;
AN_GH = 0.5;
AN_HFB = 0.47;
AN_PGU = 0.5;
AN_BH = 0.58;
ang_cri_GH = asin(AN_GH);
ang_cri_HFB = asin(AN_HFB);
ang_cri_PGU = asin(AN_PGU);
ang_cri_BH = asin(AN_BH);
fibersize = 1e-3/2;
c=3e8;          % Light speed in (m/s)
tasaCalc = 200;
L = length;
d = SourceToFiberDist;
dd = FiberToDetectorDist;

lambda = OutNode{1}.Signal.wavelength;
entrada = OutNode{1}.Signal.Ex;
modos = OutNode{1}.Signal.SpatialX.Field;
nx = OutNode{1}.Signal.SpatialX.nx;
xmin = OutNode{1}.Signal.SpatialX.xmin;
ejemodos_orig = linspace(xmin, abs(xmin), nx);
ejemodos= linspace(xmin, abs(xmin), nx);
dist = Zcalc(modos, nx, xmin, lambda);
dist_orig = dist;
ejetita_ext_Z_orig = atan(ejemodos(ceil(nx/2):nx)*1e-6/dist);
ejetita_ext_Z = atan(ejemodos(ceil(nx/2):nx)*1e-6/dist);
corte_orig = abs(modos(ceil(nx/2), ceil(nx/2):nx));
corte = abs(modos(ceil(nx/2), ceil(nx/2):nx));
if d ~= 0
```



```

    dist = d;
    ejemodos = d*10^6*tan(ejetita_ext_Z);
    ejemodos = [-fliplr(ejemodos(2:end)) ejemodos];
end
if (ejetita_ext_Z(end)*180/pi < 15) || (max(size(ejetita_ext_Z)) > 180)
% Empieza el resample
pasomodos = diff(ejemodos);
pasomodos = pasomodos(1);
ejemodosFin = dist*tan(pi/4);
ejemodosPos = [ejemodos(ceil(nx/2):nx)*1e-6 [(ejemodos(nx)+pasomodos)*1e-
6:pasomodos*1e-6:ejemodosFin]];
tasaRs = ceil(max(size(ejemodosPos))/tasaCalc);
cortePlus = abs(modos(ceil(nx/2),ceil(nx/2)-10*tasaRs:nx));
corte_big = [cortePlus zeros(1,max(size(ejemodosPos))-
max(size(corte_orig)))];
corte = resample(corte_big,1,tasaRs);
corte = corte(10+1:end-20);
ejetita_ext_Z_big = atan(ejemodosPos/dist);
ejetita_ext_Z = resample(ejetita_ext_Z_big,1,tasaRs);
ejetita_ext_Z = ejetita_ext_Z(1:end-20);
% % % % % % %
end
ejetita_int_Z = asin(sin(ejetita_ext_Z)/n_core);
I_source = corte.^2;

if ~strcmp(input_launch, 'spatial_input')
    lfile = importdata(launch_file);
    [noimporta, formato] = strtok(lfile.textdata)
    if strcmp(input_launch, 'I_exterior_file')
        if strcmp(formato, ' [radians]')
            ejetita_ext_Z_orig = linspace(lfile.data(1,2), lfile.data(1,3),
lfile.data(1,1));
        else
            ejetita_ext_Z_orig = linspace(lfile.data(1,2), lfile.data(1,3),
lfile.data(1,1))*pi/180;
        end
    elseif strcmp(input_launch, 'I_interior_file')
        if strcmp(formato, ' [radians]')
            ejetita_int_Z_orig = linspace(lfile.data(1,2), lfile.data(1,3),
lfile.data(1,1));
        else
            ejetita_int_Z_orig = linspace(lfile.data(1,2), lfile.data(1,3),
lfile.data(1,1))*pi/180;
        end
        ejetita_ext_Z_orig = asin(n_core*sin(ejetita_int_Z_orig));
    end
    ejetita_ext_Z = ejetita_ext_Z_orig;
    I_source_orig = abs(lfile.data(2:end,1))';
    I_source = abs(lfile.data(2:end,1))';
    if (ejetita_ext_Z(end)*180/pi < 15) || (max(size(ejetita_ext_Z)) > 180)
    % Empieza el resample
    ejetita_Fin = pi/4;
    ejetita_Pos = [ejetita_ext_Z_orig
[(ejetita_ext_Z_orig(end)+ejetita_ext_Z_orig(2)):ejetita_ext_Z_orig(2):ejet
ita_Fin]];
    tasaRs = ceil(max(size(ejetita_Pos))/tasaCalc);
    I_sourcePlus = [fliplr(I_source_orig(2:10*tasaRs+1)) I_source_orig];
    I_source_big = [I_sourcePlus zeros(1,max(size(ejetita_Pos))-
max(size(I_source_orig)))];
    I_source = resample(I_source_big,1,tasaRs);
    I_source = I_source(10+1:end-20);

```



```

    ejetita_ext_Z = resample(ejetita_Pos,1,tasaRs);
    ejetita_ext_Z = ejetita_ext_Z(1:end-20);
end
%
end

I_source = I_source/max(I_source);

I = I_source;
if d ~= 0
    ejemetros = d*tan(ejetita_ext_Z);
elseif d == 0
    ejemetros = dist*tan(ejetita_ext_Z);
end
fuera = find(ejemetros > fibersize);
if isempty(fuera)~=1
    I(fuera(1):fuera(end)) = 0;
end
rebotan = eval(strcat('find(ejetita_ext_Z > ang_cri_',FiberType,')'));
if isempty(rebotan)~=1
    I(rebotan(1):rebotan(end)) = 0;
end

%-----%
%% Introduccion de la señal representada en grados al modelo
%-----%

% Entrada a la fibra (dominio espacial)
F_X = I';% /max(I);

% Entrada a la fibra (dominio temporal)
in_rt = zeros(size(OutNode{1}.Signal.Ex,2), 2);
in_rt(:,1) =
    (OutNode{1}.Signal.startTime:OutNode{1}.Signal.tStep:OutNode{1}.Signal.tStep*
    (OutNode{1}.Signal.noPoints-1));
in_rt(:,2) = (OutNode{1}.Signal.Ex).^2;
S = fft(in_rt(:,2));
F_F = (S(1:max(size(S))/2+1)).';

global X F P z
X = ejetita_ext_Z*180/pi;
Fsamp = 1/in_rt(2,1);
F = linspace(0,Fsamp/2/1e6,size(F_F,2));
P_Z=zeros(max(size(X)),max(size(F)));
P_Z_in=F_X*F_F/F_F(1);
P_Z = P_Z_in;

L1 = L;
z=0;
z=z+L1;
L1=2*L1;

route =
['BaseDatosM\',FiberType,'_',num2str(max(size(X))),'_',num2str(max(size(F))
),'_',num2str(X(2)),'_',num2str(Fsamp),'.mat'];
routeA =
['BaseDatosM\',FiberType,'_',num2str(max(size(X))),'_',num2str(max(size(F))
),'_',num2str(X(2)),'_',num2str(Fsamp),'.A','.mat'];

```

```

routeD =
['BaseDatosM\',FiberType,'_',num2str(max(size(X))),'_',num2str(max(size(F))
),'_',num2str(X(2)),'_',num2str(Fsamp),'D','mat'];
listado = dir(route);
if isempty(listado)
    M = fibergenpablo(X,F,FiberType,route,routeA,routeD,n_core);
else
    load(route)
end

for kk=1:max(size(F))
    P_Z(:,kk)=(M(:, :, kk) ^L1) *P_Z(:,kk);
end

vPMMA = c/n_core;
td = z/vPMMA/1e-6; % F (MHz), td (us)

P_f_Z = sin(X*pi/180)*(P_Z)*F_F(1)/sum(sin(X*pi/180)*I_source');
P_f_Z = P_f_Z.*exp(i*2*pi*F*td);
P_f_doble_Z = [P_f_Z(1:size(P_f_Z,2)-1), fliplr(conj(P_f_Z(2:end)))];
p_t_Z = ifft(P_f_doble_Z);
p_t_Z(find(p_t_Z<0))=0;

%% Parte Espacial

P_X_Z = P_Z.*repmat(exp(1i*2*pi*F*td),size(P_Z,1),1);
P_X_Z_doble = [P_X_Z(:,1:size(P_X_Z,2)-1), fliplr(conj(P_X_Z(:,2:end)))];
p_x_Z = ifft(P_X_Z_doble.);
p_x_Z = sum(real(p_x_Z));

% Generamos con el corte de la informacion espacial en todos los angulos
order = max(size(p_x_Z))-1;
[rx,ry] = meshgrid(-order:order, -order:order);
r = hypot(rx,ry);
vq = interp1(0:order, p_x_Z, r(:), 'linear', 0 );
p_x_Z_360 = r;
p_x_Z_360(:) = vq;

%% -----%
% Cálculo de pérdidas en espacio y tiempo
%-----%

X = X';
P = P_Z;
Pout_Z = pow('Pout_Z', 'dB');
P = P_Z_in;
Pin_Z = pow('Pin_Z', 'dB');
L_sp_Z = (Pout_Z - Pin_Z)/L;
L_t_Z = 10*log10(sum(real(p_t_Z))/sum(in_rt(:,2)))/L; % Pérdidas en dB/m:
TIEMPO

%% -----%
% Generación señal de salida
%-----%
y = x;
y.Signal.Ex = p_t_Z.^(1/2);
if dd ~= 0
    dout = dd
elseif dd == 0

```

```

    dout = dist_orig;
end

eje_um = dout*10^6*tan(ejetita_ext_Z);
y.Signal.SpatialX.xmin = -eje_um(end);
y.Signal.SpatialX.ymin = -eje_um(end);
eje_spatial_out = linspace(-eje_um(end),eje_um(end),2*max(size(eje_um))-1);
y.Signal.SpatialX.Field = p_x_Z_360;
y.Signal.SpatialX.nx = max(size(y.Signal.SpatialX.Field));
y.Signal.SpatialX.ny = max(size(y.Signal.SpatialX.Field));
y.Signal.SpatialX.dx = (abs(y.Signal.SpatialX.xmin)-
y.Signal.SpatialX.xmin)/(y.Signal.SpatialX.nx-1);
y.Signal.SpatialX.dy = (abs(y.Signal.SpatialX.xmin)-
y.Signal.SpatialX.xmin)/(y.Signal.SpatialX.nx-1);
inner = (p_x_Z_360);
%
if strcmp(SameSpatialAxis, 'yes')
if isempty(find(eje_spatial_out < x.Signal.SpatialX.xmin))
    paso_mod = eje_spatial_out(ceil(max(size(eje_spatial_out))/2)+1)-
eje_spatial_out(ceil(max(size(eje_spatial_out))/2));
    num_pasos_mod = ceil(abs(x.Signal.SpatialX.xmin)/paso_mod);
    eje_spatial_out = linspace(-
paso_mod*num_pasos_mod,paso_mod*num_pasos_mod,2*num_pasos_mod+1)
    num_muestras_ext = (2*num_pasos_mod+1-size(p_x_Z_360,1))/2;
    p_x_Z_360_ext = zeros(2*num_pasos_mod+1,2*num_pasos_mod+1);

p_x_Z_360_ext(num_muestras_ext+1:num_muestras_ext+size(p_x_Z_360,1),num_mue
stras_ext+1:num_muestras_ext+size(p_x_Z_360,1)) = p_x_Z_360;
    p_x_Z_360 = p_x_Z_360_ext;
end
eje_spatial_out_min = find(eje_spatial_out < x.Signal.SpatialX.xmin);
eje_spatial_out_min = eje_spatial_out_min(end)+1;
eje_spatial_out_max = find(eje_spatial_out > abs(x.Signal.SpatialX.xmin));
eje_spatial_out_max = eje_spatial_out_max(1)-1;
y.Signal.SpatialX.xmin = eje_spatial_out(eje_spatial_out_min);
y.Signal.SpatialX.ymin = eje_spatial_out(eje_spatial_out_min);
eje_spatial_out_mod =
linspace(y.Signal.SpatialX.xmin,abs(y.Signal.SpatialX.xmin),eje_spatial_out
_max - eje_spatial_out_min + 1);
y.Signal.SpatialX.Field =
p_x_Z_360(eje_spatial_out_min:eje_spatial_out_max,eje_spatial_out_min:eje_s
patial_out_max);
y.Signal.SpatialX.nx = max(size(y.Signal.SpatialX.Field));
y.Signal.SpatialX.ny = max(size(y.Signal.SpatialX.Field));
y.Signal.SpatialX.dx = (abs(y.Signal.SpatialX.xmin)-
y.Signal.SpatialX.xmin)/(y.Signal.SpatialX.nx-1);
y.Signal.SpatialX.dy = (abs(y.Signal.SpatialX.xmin)-
y.Signal.SpatialX.xmin)/(y.Signal.SpatialX.nx-1);
inner =
p_x_Z_360(eje_spatial_out_min:eje_spatial_out_max,eje_spatial_out_min:eje_s
patial_out_max);
end
%
inner(1,:)=1/2*inner(1,:);
inner(end,:)=1/2*inner(end,:);
inner(:,1)=1/2*inner(:,1);
inner(:,end)=1/2*inner(:,end);
inner = y.Signal.SpatialX.dx^2*sum(sum(inner));
field_x_Z_360_norm = (1/inner*y.Signal.SpatialX.Field).^(1/2);
y.Signal.SpatialX.Field = field_x_Z_360_norm*exp(i*dout);
OutNode{1} = y;

```

Y finalizando por el archivo “MatlabConnector” que corresponde con el modelo matricial para los conectores:

```
% Desarrollado por Pablo Martínez Gómez
%
% Modelo de conector optico con atenuación e incluyendo perdidas por
% desalineamientos adaptado al software Optsim.

OutNode{1} = InNode{1};
format long
xc = InNode{1};
set(0, 'DefaultFigureCloseRequestFcn', @my_closereq)
figure(1)

fibersize = 1e-3/2;
lambda = OutNode{1}.Signal.wavelength;
modos = OutNode{1}.Signal.SpatialX.Field;
nx = OutNode{1}.Signal.SpatialX.nx;
xmin = OutNode{1}.Signal.SpatialX.xmin;
ejemodos = linspace(xmin, abs(xmin), nx);
dx = OutNode{1}.Signal.SpatialX.dx;
corte = abs(modos(ceil(nx/2), ceil(nx/2):nx));
dist = Zcalc(modos, nx, xmin, lambda);
dist_orig = dist;
ejetita_ext = atan(ejemodos(ceil(nx/2):nx)*10^-6/dist);
I_source = corte.^2;
I_source = I_source/max(I_source);

nulos = find(ejetita_ext*180/pi > 45);
if isempty(nulos)~=1
    I_source= I_source(1:nulos(1)-1);
    ejetita_ext=ejetita_ext(1:nulos(1)-1);
end

I = I_source;

global X P
% Entrada a la fibra (dominio espacial)
F_X = I';

% Entrada a la fibra (dominio temporal)
in_rt = zeros(size(OutNode{1}.Signal.Ex,2), 2);
in_rt(:,1) =
    (OutNode{1}.Signal.startTime:OutNode{1}.Signal.tStep:OutNode{1}.Signal.tStep*
    (OutNode{1}.Signal.noPoints-1));
in_rt(:,2) = (OutNode{1}.Signal.Ex).^2;
S = fft(in_rt(:,2));
F_F = (S(1:max(size(S))/2+1)).';

X = ejetita_ext*180/pi;

if strcmp(Polished, 'Yes')
    ConnectorType = [ConnectorModel, 'p_', ConnectorFiber];
else
    ConnectorType = [ConnectorModel, '_', ConnectorFiber];
end
```

```

route =
['BaseDatosM\','ConnectorType','_',num2str(max(size(X))),'_',num2str(X(2)),'.
mat'];
routeA =
['BaseDatosM\','ConnectorType','_',num2str(max(size(X))),'_',num2str(X(2)),'A
','mat'];
routeD =
['BaseDatosM\','ConnectorType','_',num2str(max(size(X))),'_',num2str(X(2)),'D
','mat'];
listado = dir(route);
if isempty(listado)
    ConnectorMatPablo(ejetita_ext*180/pi, ConnectorType, route, routeA,
routeD);
end
load(route)

P=zeros(max(size(F_X)),max(size(F_F)));
P_in=F_X*F_F/F_F(1);
P = P_in;
type = ConnectorType;
r = RadialMisalignment;
z = LongitudinalMisalignment
x0 = r/1000;
z0 = z/1000;
theta_deg = X;

if strcmp(ConnectorAprox, 'Vectorial')
    connectorV(route, RadialMisalignment, LongitudinalMisalignment);
elseif strcmp(ConnectorAprox, 'Constante')
    connector(route,RadialMisalignment,LongitudinalMisalignment)
end

P_f = sin(X*pi/180)*P*F_F(1)/sum(sin(X*pi/180)*I_source');
P_f_doble = [P_f(1:size(P_f,2)-1), fliplr(conj(P_f(2:end)))];
p_t = ifft(P_f_doble);
p_t(find(p_t<0))=0;

P_X_doble = [P(:,1:size(P,2)-1), fliplr(conj(P(:,2:end)))];
p_X = ifft(P_X_doble.);
p_x = sum(real(p_X));

order = max(size(p_x))-1;
[rx,ry] = meshgrid(-order:order, -order:order);
r = hypot(rx,ry);
vq = interp1(0:order, p_x, r(:), 'linear', 0 );
p_x_360 = r;
p_x_360(:) = vq;
%%
y = xc;
y.Signal.Ex = p_t.^(1/2);
dout = dist_orig;

eje_um = dout*10^6*tan(ejetita_ext);
y.Signal.SpatialX.xmin = -eje_um(end);
y.Signal.SpatialX.ymin = -eje_um(end);
eje_spatial_out = linspace(-eje_um(end),eje_um(end),2*max(size(eje_um))-1);
y.Signal.SpatialX.Field = p_x_360;
y.Signal.SpatialX.nx = max(size(y.Signal.SpatialX.Field));
y.Signal.SpatialX.ny = max(size(y.Signal.SpatialX.Field));

```

```
y.Signal.SpatialX.dx = (abs(y.Signal.SpatialX.xmin) -  
y.Signal.SpatialX.xmin) / (y.Signal.SpatialX.nx-1);  
y.Signal.SpatialX.dy = (abs(y.Signal.SpatialX.xmin) -  
y.Signal.SpatialX.xmin) / (y.Signal.SpatialX.nx-1);  
inner = (p_x_360);  
inner(1,:) = 1/2*inner(1,:);  
inner(end,:) = 1/2*inner(end,:);  
inner(:,1) = 1/2*inner(:,1);  
inner(:,end) = 1/2*inner(:,end);  
inner = y.Signal.SpatialX.dx^2*sum(sum(inner));  
field_x_360_norm = (1/inner*y.Signal.SpatialX.Field).^(1/2);  
y.Signal.SpatialX.Field = field_x_360_norm*exp(i*dout);  
OutNode{1} = y;
```