

## Proyecto Fin de Carrera

Plataforma de simulación de sistemas de  
comunicaciones basados en fibra óptica de  
plástico mediante Simulink

Autor:

Ana María Alcoceba Pascual

Director:

Alicia López Lucia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Junio 2015



## AGRADECIMIENTOS

A Alicia y a Javier por ayudarme en este trabajo y enseñarme cosas tanto dentro como fuera de la escuela

A todos los que habéis pasado por mi vida a lo largo de estos años, porque todos me habéis aportado algo positivo.

A mis padres y a mi hermano por estar siempre ahí, querermme y animarme.

A Óscar, por apoyarme, entenderme y querermme, en los buenos momentos, y sobre todo en los malos.

A todos mis amigos, en especial a David y a Bea, con quienes tantas horas y confiancias he compartido.

A todos, GRACIAS.



# PLATAFORMA DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES BASADOS EN FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO MEDIANTE SIMULINK.

## RESUMEN

Actualmente, el uso de la fibra óptica de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*) está en auge en entornos de corto alcance, como redes en aviones, automóviles o en el hogar, debido a las características particulares de este tipo de fibra. La más destacable es el tamaño de su núcleo (mucho más grande que el de la fibra de vidrio), que facilita la inyección de luz aún en instalaciones con menos precisión, por lo que permite usar componentes de más bajo coste.

En este proyecto se usa un modelo matemático desarrollado en el grupo en que se enmarca el trabajo. Este modelo describe la propagación de la luz a través de las fibras ópticas de plástico mediante una formulación matricial, por lo que se denomina modelo matricial. Aquí nos planteamos integrar dicho modelo, que consiste en un conjunto de códigos programados en Matlab, en una plataforma de simulación que permita obtener resultados de prestaciones a nivel de sistema. En concreto, el objetivo principal de este proyecto es la creación de una librería de bloques en Simulink que modelen los componentes principales de los sistemas de transmisión basados en fibra óptica de plástico, además de otros que permitan medir y representar características interesantes del sistema, como la función de transferencia, el ancho de banda a 3 dB o la potencia que se transmite por el sistema.

La integración del modelo matricial en la plataforma de simulación Simulink ha implicado la introducción de una modificación fundamental sobre el planteamiento inicial del modelo. Mediante esta modificación, es posible considerar una única variable del sistema que contiene tanto la información espacio-temporal de la infraestructura de fibra como la información temporal de la señal. De esta forma la simulación del sistema POF se realiza de forma dinámica y es posible obtener la señal en cualquier punto de la cadena de transmisión. Para comprobar el correcto funcionamiento de los bloques desarrollados se han creado enlaces POF con diversas configuraciones simples. Debido a que los parámetros principales de simulación le son requeridos al usuario, se ha realizado un pequeño estudio de cuáles son los efectos de dichos parámetros en la salida del sistema POF y cuáles son sus limitaciones. Además, se ha propuesto un sistema en que se ha añadido ruido pensando en una situación más realista. Comprobado que los bloques realizan su función y que el sistema completo aporta una salida correcta, se ha procedido a crear la librería como tal. De este modo, incluyéndola en el directorio en el que estemos trabajando, podemos disponer de los bloques para crear el sistema que se desee.



# INDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo del proyecto.....	1
1.2. Contenido de la memoria.....	2
Capítulo 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	4
2.1. Modelado de la fibra óptica de plástico (POF) .....	4
2.1.1. Características de la fibra óptica de plástico (POF) .....	4
2.1.2. Modelo matricial de propagación de potencia óptica en fibras de plástico.....	6
2.1.3. Integración del modelo matricial. ....	7
2.2. El entorno Simulink .....	9
2.2.1. Bloques personalizados en Simulink: S-functions .....	10
2.2.2 Métodos callback .....	10
2.2.3. Procesado basado en muestras (modo sample) .....	11
2.2.4. Procesado basado en tramas (modo frame).....	12
2.2.5. Selección del modo de simulación .....	14
2.2.4 Parámetros introducidos por el usuario .....	15
Capítulo 3: INTEGRACIÓN DEL MODELO POF EN SIMULINK .....	17
3.1. Aspectos generales.....	17
3.2. Bloques del sistema de transmisión POF .....	18
3.2.1. Emisor.....	18
3.2.2. Fibra óptica (SI-POF).....	21
3.2.3. Conector .....	23
3.2.4. Acoplador .....	25
3.2.5. Receptor .....	26
3.3. Bloques de medida y representación.....	27
3.3.1. Medidor de potencia.....	28
3.3.2. Respuesta frecuencial equivalente .....	28
3.3.3. Retardo de grupo .....	29
3.3.4. Respuesta impulsional equivalente .....	29
3.3.5. Patrón de campo lejano .....	30
3.3.6. Medidor de ancho de banda .....	30
3.4. Componentes eléctricos.....	30

3.4.1. Subsistema en el transmisor .....	30
3.4.2. Subsistema en el receptor.....	34
3.5. Librería POF .....	36
4.1 Sistema de prueba.....	38
4.1.1. Descripción.....	38
4.1.2. Parámetros considerados.....	40
4.2. Distribución espacial del emisor .....	40
4.2.1. Fuente óptica tipo LED .....	40
4.2.2. Fuente óptica tipo láser.....	42
4.3. Longitud de la fibra .....	44
4.4. Conectores con desalineamientos .....	45
4.4.1. Desalineamiento axial .....	46
4.4.2. Desalineamiento longitudinal .....	47
4.5. Área del receptor .....	48
4.5.1. Ángulo máximo de 5° .....	48
4.5.2. Ángulo máximo de 15° .....	49
4.6. Tasa de transmisión .....	51
4.7. Señalización multinivel.....	53
4.8. Introducción de ruido.....	55
Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	57
5.1 Conclusiones del PFC.....	57
5.2 Posibilidad de continuación y mejora del trabajo.....	57
5.3 Valoración del trabajo .....	58
Anexo I: CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA GH Y CONECTOR VL .....	62
I.1 Mitsubishi, GH-4001.....	62
I.2 Conector VL .....	65
Anexo II: EJEMPLO PRÁCTICO DE PROGRAMACIÓN DE BLOQUES.....	66
Anexo III: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PROYECTO: Diagrama de Gantt .....	69



# Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Este proyecto se ubica dentro del trabajo que desarrolla parte del grupo de tecnologías fotónicas de la Universidad de Zaragoza (GTF), el cual se dedica a la investigación de las características de propagación de la fibra óptica de plástico. Dentro de este grupo se ha ideado y desarrollado un modelo para POF que permite describir la propagación de la luz a través de este tipo de fibra. En este proyecto se ha integrado dicho modelo en un entorno de simulación generalista como es Simulink.

## **1.1. Objetivo del proyecto**

La fibra óptica de plástico POF (*Plastic Optical Fiber*) es ampliamente usada en entornos de corto alcance como es el caso de las redes en aviones, en el automóvil o el hogar[1]. Esto es debido a las características de este tipo de fibra que la diferencian de la más extendida fibra de vidrio. Entre estas características cabe destacar su tamaño, mayor que en las de vidrio, que la hace más fácilmente manejable, reduciendo costes de instalación y mantenimiento así como de componentes asociados. Por otra parte, debido a sus características físicas la POF permite la propagación de millones de modos por su núcleo, lo que dificulta la descripción de la propagación de la luz a través de esta fibra, que requiere de una caracterización espacio-temporal. Actualmente, los principales entornos software comerciales de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas no incluyen modelos de POF, por lo que surge la motivación de crear una librería propia incluyendo los principales componentes necesarios para la simulación de sistemas basados en este tipo de fibra. Para conocer las prestaciones de un sistema de comunicaciones ópticas basado en POF, es necesario introducir un modelo de este tipo de fibra en software comercial de diseño de redes ópticas. La mayor parte de los entornos de simulación presentan modelos de fibra monomodo estándar y de fibra multimodo de vidrio cuyas propiedades son muy diferentes a las de las fibras de plástico. Las fibras multimodo de vidrio son de bastante menor tamaño que las fibras de plástico y por tanto, son capaces de propagar un número de modos mucho menor. Esto permite un tratamiento matemático modelando grupos de modos, lo que no es posible en las fibras de plástico donde se propagan millones de ellos. Este hecho permite tratar los modos como un continuo y describir la propagación de potencia óptica en la fibra mediante una ecuación diferencial [2]. En el grupo de POF de la EINA se ha abordado la resolución de esta ecuación utilizando un enfoque matricial y se ha desarrollado un modelo que describe la propagación de potencia en la fibra mediante una matriz. Este enfoque matricial, que ha sido validado previamente con resultados experimentales, es robusto y flexible para ser integrado en software comercial. Además, el modelo permite la incorporación de efectos localizados o dispositivos de forma simple siempre que estos puedan ser modelados como matrices.

Actualmente, el modelo consiste en un conjunto de códigos y funciones Matlab a través de los cuales se pueden obtener algunos parámetros básicos de sistemas POF como pérdidas o ancho de banda.

Este proyecto aborda la problemática del modelado de sistemas basados en fibra óptica de plástico. Su objetivo es la implementación de una plataforma de simulación de sistemas basados en POF que permita evaluar sus prestaciones en términos de parámetros de comunicaciones tales como tasa de error o velocidad de transmisión; además de relacionar estos parámetros

eléctricos con parámetros ópticos tales como la distribución espacial y frecuencial de la luz, el tipo y la longitud de la fibra o el tipo de conector a utilizar. Este sistema permitirá evaluar técnicas de transmisión avanzadas en sistemas de comunicaciones POF, hasta el rango de los Gb/s, como se ha demostrado recientemente que es posible [3].

La integración del modelo en una plataforma software de simulación a nivel de sistema es posible gracias a una serie de modificaciones sobre el mismo y consideraciones sobre el modo en que se lleva a cabo la simulación. En particular y como novedad, en este proyecto fin de carrera se introduce una modificación en la variable de entrada al sistema POF de forma que se incluye la información de la señal que se transmite. Así, conseguimos que la variable que se transfiere entre bloques de simulación contenga toda la información espacio-temporal, tanto la asociada al enlace como aquella asociada a la propia señal, lo que nos permite evaluar las prestaciones del sistema en cualquier punto del mismo.

Disponer de esta herramienta de simulación dotará al grupo de tecnologías fotónicas de la potencia para conocer la viabilidad y las prestaciones de distintas configuraciones de forma previa a su implementación, lo cual es esencial para evaluar nuevos campos de aplicación de la fibra de plástico, como las redes en el avión. Para este propósito se ha elegido el entorno Simulink que ya dispone de bloques genéricos para sistemas de comunicaciones y bloques personalizables, además de presentar una estrecha relación con Matlab.

La realización de este proyecto comprende las siguientes tareas:

- Documentación sobre la fibra óptica de plástico, concretamente sobre el modelo POF del grupo GTF; parámetros implicados en él y las dependencias que existen entre ellos y/o con las dimensiones espacial y frecuencial.
- Documentación sobre el entorno Simulink y su programación.
- Integración del modelo POF en la plataforma de simulación Simulink, generación de librería específica para fibra de plástico y componentes asociados.
- Validación, pruebas de funcionamiento.
- Aspectos de rendimiento.
- Extracción de resultados y conclusiones a partir de la evaluación de un sistema de prueba.

## 1.2. Contenido de la memoria.

En las siguientes líneas se detalla la estructura de los contenidos de la memoria del proyecto.

- Capítulo 1: Introducción

A lo largo de este capítulo se plantea la situación actual de la fibra óptica y se presenta la motivación del proyecto. Además, se hace una descripción del contenido de cada capítulo de la memoria.

- Capítulo 2: Fundamentos teóricos

En primer lugar se introduce los aspectos básicos de la fibra óptica de plástico (POF), sus características y las diferencias fundamentales con la fibra óptica de vidrio. Además se explica el modelo matricial en el que se basa este proyecto para poder desarrollar la

programación de los diferentes bloques. Después se presenta el entorno de trabajo, describiendo los aspectos principales de Simulink y destacando los utilizados en la realización del proyecto.

- Capítulo 3: Integración del modelo POF en Simulink.

En este capítulo se especifican los dos tipos de bloques que se van a crear: los relacionados propiamente con el sistema de transmisión y los bloques de medida y representación gráfica. Así mismo, para poder probar los nuevos bloques que se han incluido en la librería creada, se han desarrollado tanto transmisor como receptor eléctricos mediante bloques de la librería de comunicaciones de Simulink y nuevos bloques en caso de ser necesarios.

- Capítulo 4: Ejemplos de aplicación.

En este capítulo se presentan varios ejemplos de aplicación que hacen uso de la librería específica creada, explicando los efectos producidos al variar los parámetros más significativos tanto de la transmisión como del propio enlace POF.

- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

Para finalizar, se expondrán las conclusiones obtenidas durante la realización del proyecto y las posibilidades de continuación y propuesta de mejoras, además de una valoración personal del trabajo realizado

# Capítulo 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los fundamentos sobre los que se basa el trabajo realizado en este proyecto fin de carrera. La primera parte del capítulo introduce los conceptos sobre la fibra óptica de plástico, mientras que la segunda parte trata sobre el entorno de programación usado para la realización del proyecto: Simulink.

La primera tarea a realizar en este trabajo es la documentación sobre la fibra óptica de plástico. Obtener esta información es muy importante debido a las diferencias que en cuanto a características tiene con la fibra de vidrio, más conocida. La siguiente fase es la documentación sobre Simulink. Este programa está estrechamente relacionado con Matlab. Por ello se elige para crear el conjunto de bloques para poder simular modelos basados en fibra de plástico, ya que se parte de unos códigos iniciales programados en Matlab y de matrices de datos creadas anteriormente a partir de medidas experimentales.

## 2.1. Modelado de la fibra óptica de plástico (POF)

En esta sección se presenta la fibra óptica de plástico, destacando las características que la hacen tan diferente de la fibra de vidrio y sus ventajas frente a ésta, por las que la fibra de plástico es cada vez más utilizada en entornos de corto alcance en los que se busca simplicidad y bajo coste.

### 2.1.1. Características de la fibra óptica de plástico (POF)

La fibra óptica de plástico, denominada por sus siglas en inglés como POF (*Plastic Optical Fiber*) consiste en una estructura cilíndrica de diámetro cercano al milímetro y diseñada para guiar luz. Esta estructura, mostrada en la Figura 2.1, está compuesta por un revestimiento externo o *jacket* y una parte interior de material termoplástico en el que se diferencian dos zonas: el núcleo o *core* que ocupa la mayor parte del interior de la fibra, y la cubierta o *cladding* que lo rodea. Estas dos regiones poseen índices de refracción distintos para permitir la propagación guiada de la luz mediante múltiples reflexiones totales.

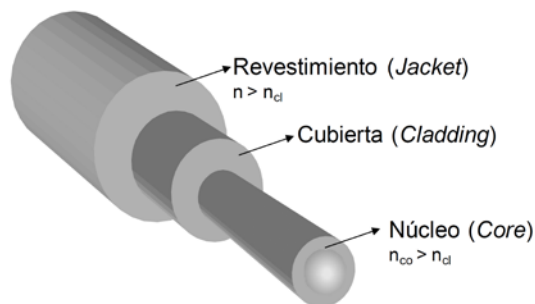


Figura 2.1: Estructura de la fibra óptica de plástico.

Las fibras ópticas de plástico se caracterizan por tener mayor tamaño y apertura que las fibras de vidrio o Sílice, por lo que captan más luz en condiciones que requieren una menor precisión, permitiendo su uso con dispositivos de bajo coste. Por otra parte, presentan una atenuación más alta y anchos de banda menores [4] que las fibras de vidrio por lo que su aplicación

fundamental es como medio de transmisión en redes de corto alcance, como son las redes domésticas o las redes dentro de medios de transporte (automóviles, aviones, etc.) [5-6]

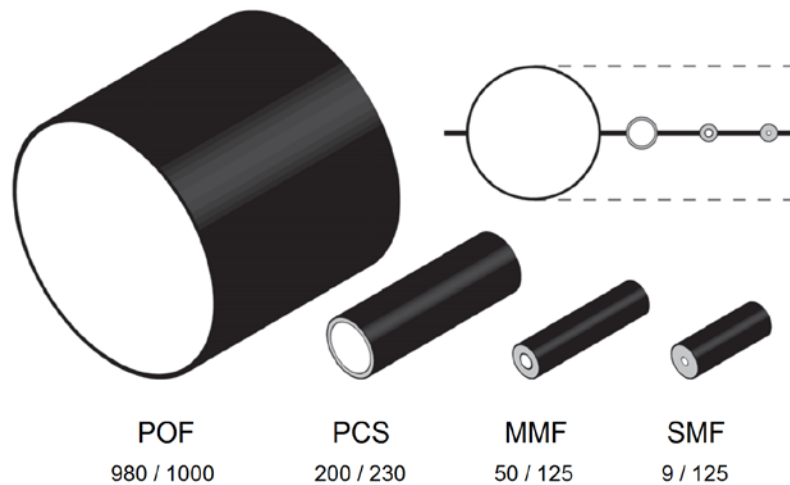


Figura 2.2: Comparación del tamaño de los diferentes tipos de fibras ópticas que incluyen valores típicos para cotas de diámetro núcleo / revestimiento en micras.

Si comparamos el tamaño de la fibra de plástico con el de otras fibras ópticas, como muestra la Figura 2.2, la POF es la que presenta mayor diámetro [7]. Su núcleo, de aproximadamente 1 mm, es considerablemente mayor que el de cualquiera de las otras fibras. Este tamaño marca el número de modos que se pueden propagar. Por lo tanto, la fibra óptica de plástico es la que mayor número de modos puede propagar (millones de ellos) y es precisamente esta alta multimodalidad lo que dificulta su modelado. Por otra parte, que la POF tenga un diámetro mucho más grande que cualquier otra fibra permite un fácil manejo y la transmisión, incluso si los extremos de la fibra están ligeramente dañados o el eje de propagación de la luz está ligeramente fuera del centro de la fibra. Gracias a esto, los componentes asociados a los sistemas POF, tales como conectores ópticos se pueden hacer por bajo coste y además la instalación de enlaces de POF se simplifica.

En cuanto a la atenuación, la fibra óptica de plástico presenta valores mucho más altos que la de vidrio. Esto repercute en la longitud máxima que se puede usar, mucho menor que con la de vidrio, trabajando siempre en el rango de las decenas de metros. En relación al ancho de banda, éste es menor que el de las fibras de vidrio debido principalmente al hecho de que son muy multimodales, lo que hace que presenten una gran dispersión modal además de un fuerte acoplo entre modos [8].

Aparte de las propiedades físicas, es importante tener en cuenta los componentes ópticos disponibles para cada tipo de fibra. Estos incluyen componentes pasivos tales como conectores, acopladores, filtros y atenuadores y también componentes activos como las fuentes ópticas y los fotodiodos. El desarrollo de componentes de POF para aplicaciones de comunicaciones está condicionado por la búsqueda constante de mayor ancho de banda y mejor balance de potencia.

Resumiendo, entre las ventajas más destacables que presenta la fibra óptica de plástico están las siguientes [5]:

- Ligereza
- Inmunidad a las interferencias electromagnéticas (EMI)
- Funcionamiento en el visible.

- Mayor resistencia a flexión, golpes y vibraciones
- Componentes más simples y menos costosos. Facilidad de manejo y conexión

Entre las desventajas principales se encuentran las siguientes:

- Pérdidas altas en la transmisión.
- Anchos de banda menores

### 2.1.2. Modelo matricial de propagación de potencia óptica en fibras de plástico

En este apartado se describe el modelo matricial de propagación de potencia en la fibra. Este modelo recibe su nombre por la forma cómo se formula, de modo que cada componente que constituye el enlace POF se puede caracterizar por una matriz y las transformaciones que la distribución espacial de la potencia óptica experimenta al atravesar el enlace. Estas transformaciones se obtienen mediante simples productos de matrices.

El modelo de propagación utilizado se basa en la ecuación de flujo de Gloge [9-10] que describe la evolución de la distribución de potencia modal cuando es transmitida por una POF y en la que el ángulo de propagación respecto al eje de la fibra  $\theta$ , está considerado como una variable continua:

$$\frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial z} = -\alpha(\theta)P(\theta, z, t) - \frac{n}{c \cos \theta} \cdot \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \theta \cdot d(\theta) \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial \theta} \right) \quad (2.1)$$

donde  $P(\theta, z, t)$  describe la distribución de potencia óptica en función de  $\theta$ , de la longitud de fibra  $z$ , y del tiempo  $t$ , mientras que  $\alpha(\theta)$  y  $d(\theta)$  son las funciones angulares de atenuación y difusión características para cada tipo de fibra [11].

Para resolver la ecuación (2.1) se aplica un método de diferencias finitas, de tal forma que, dada la potencia angular para una longitud inicial ( $z_1$ ), la distribución de potencia para una longitud mayor ( $z_2$ ), puede ser calculada con la siguiente ecuación matricial:

$$\mathbf{p}(z_2, \omega) = (\mathbf{A}(\omega) + \mathbf{D})^m \cdot \mathbf{p}(z_1, \omega) = \mathbf{M}(\omega)^m \cdot \mathbf{p}(z_1, \omega) \quad (2.2)$$

En la ecuación anterior,  $\mathbf{M}(\omega)$  es la denominada matriz de propagación, que se obtiene a partir de dos funciones características del tipo de fibra: la atenuación y la difusión,  $\mathbf{A}(\omega)$  y  $\mathbf{D}$ , respectivamente. Las matrices de propagación de la fibra óptica utilizadas en este trabajo han sido calculadas en proyectos anteriores de forma experimental a partir de medidas del patrón de campo lejano (FFP, *Far Field Pattern*) [12]. Dichas matrices contienen toda la información espacio-temporal de la propagación de la luz a través de la POF y dependen de los ángulos de entrada y salida de la fibra, así como de la frecuencia. Por otra parte,  $\mathbf{p}(z_1, \omega)$  y  $\mathbf{p}(z_2, \omega)$  son vectores columna que describen la distribución angular de potencia en el dominio frecuencial para dos longitudes de fibra cuya diferencia es  $m$  veces la longitud básica.

Cada componente  $k$  del vector es la potencia en el ángulo de propagación discretizado  $\theta = k \cdot \Delta\theta$ , pero además teniendo la dimensión adicional de la frecuencia. Escogiendo una longitud básica  $\Delta z$  suficientemente pequeña, el valor del entero  $m$  se puede obtener para cualquier par de longitudes  $z_2 > z_1$ , como  $m = \frac{z_2 - z_1}{\Delta z}$ . En la Figura 2.3 se muestra de forma esquemática el cálculo de la distribución angular de potencia en una longitud de fibra,  $z$ . Además, se detallan las dimensiones de la matriz; ángulos de salida de potencia óptica, ángulos de entrada y frecuencia.

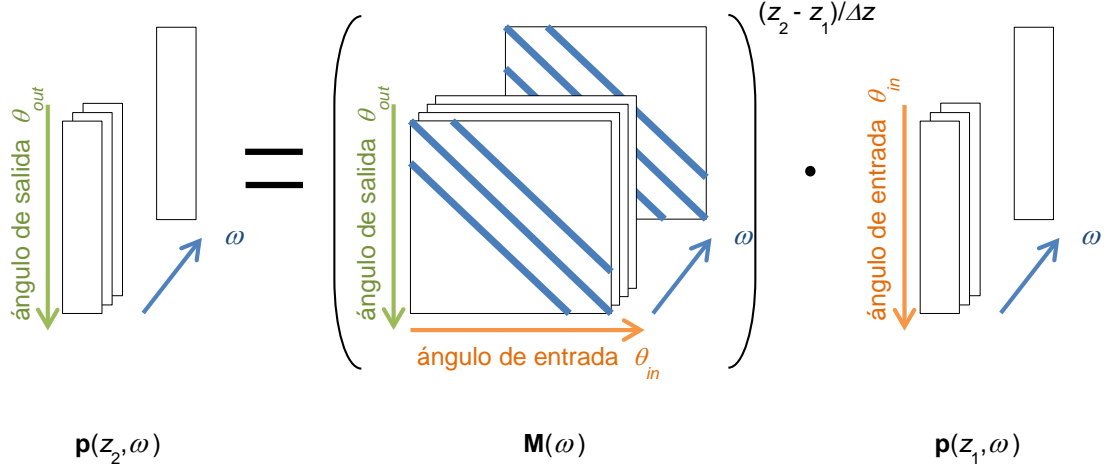


Figura 2.3: Cálculo de la distribución angular de potencia en la longitud de fibra  $z_2$ , conocida la distribución de potencia en la longitud de la fibra  $z_1$  y la matriz de propagación de la fibra.

De esta forma, una vez que la condición inicial, dada por la distribución de potencia inyectada en la fibra puesta en forma vectorial, se multiplica por la correspondiente matriz característica de la misma, se obtiene la distribución de potencia óptica,  $\mathbf{p}(\theta, z, \omega)$ , como función del ángulo de salida, de la frecuencia y de la longitud, para una determinada fuente de entrada. A partir de  $\mathbf{p}(\theta, z, \omega)$  para una serie de valores de  $z$  se pueden obtener todos los parámetros relevantes del sistema como la respuesta frecuencial en función de la longitud  $\mathbf{H}(L, \omega)$ , la potencia óptica promedio o la respuesta impulsional.

### 2.1.3. Integración del modelo matricial.

Hasta el momento la forma de simular los sistemas basados en POF consistía en crear un único bloque en el que se implementaba la función de transferencia del sistema, lo que se ha denominado metodología de dos pasos [13]. Así, según esta metodología, para realizar simulaciones a nivel de sistema de un enlace basado en POF es necesario un primer paso en el que se calcula su respuesta frecuencial equivalente para después incluir esta respuesta frecuencial en un único bloque dentro de algún entorno software de simulación de sistemas ópticos. En esencia, el primer paso considera las características del sistema de fibra mientras que en el segundo paso se incluyen las características temporales de la señal. Este proceso se describe esquemáticamente en la Figura 2.4.

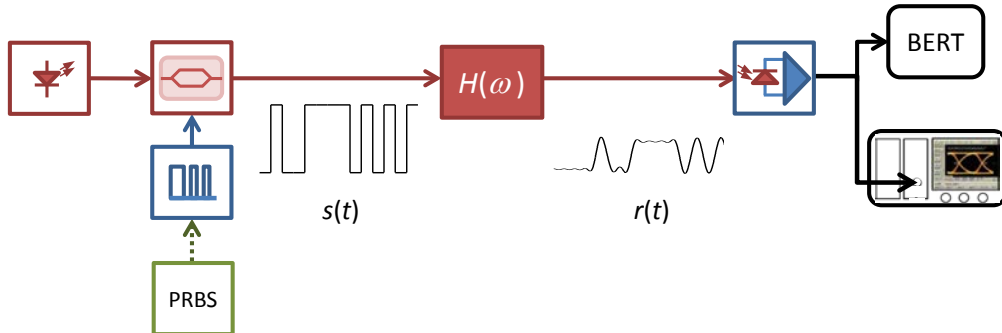


Figura 2.4: Simulación a nivel de sistema de un enlace POF de acuerdo a la metodología de dos pasos.

Siguiendo esta metodología de simulación los parámetros de cada componente del enlace POF están menos accesibles al usuario y no se tiene acceso a las señales intermedias. Sin embargo, en este proyecto fin de carrera se propone crear bloques con funciones independientes que

permiten al usuario modificar los parámetros de una forma sencilla mediante cuadros de diálogo y también se tiene acceso a las señales intermedias que se van produciendo a medida que la señal se propaga a través del sistema. Así pues, el propósito de la integración del modelo matricial que se realiza en este PFC es el de transmitir la señal entre componentes de un enlace POF con total acceso a la información a la salida de cada uno de estos componentes. Este hecho implica que la variable que se propague entre componentes o bloques de nuestro entorno de simulación debe contener toda la información espacio-temporal de la señal transmitida, al contrario de lo que ocurriría con la metodología de dos pasos. Por tanto, se ha decidido que la variable que se transmita a lo largo del sistema sea la matriz de potencia óptica, la cual se va modificando por cada componente en los puntos intermedios de la cadena de transmisión. Esta matriz contiene información angular y frecuencial del sistema de fibra, y en este trabajo se incluirá además la información temporal (a través de la variable frecuencia) de la señal [14].

Para deducir las modificaciones que debemos introducir en nuestra nueva metodología de simulación, analizaremos en más detalle la forma a través de la cual se obtiene la señal de salida del enlace POF siguiendo la metodología de dos pasos. En el primer paso, se obtiene la respuesta frecuencial equivalente a partir de la distribución espacial de la potencia de salida,  $\mathbf{p}_{out}(\omega)$ , integrándola a lo largo de la dimensión angular de acuerdo a la expresión:

$$H(\omega) = \int_{\theta=0}^{\pi/2} p_{out}(\theta, \omega) \sin(\theta) d\theta \quad (2.3)$$

donde  $p_{out}(\theta, \omega)$  es el vector  $\mathbf{p}_{out}(\omega)$ , mostrado aquí como una función continua dependiente del ángulo  $\theta$ , y de la frecuencia  $\omega$ . De acuerdo al modelo matricial,  $\mathbf{p}_{out}(\omega)$  se obtiene como producto de las matrices de potencia óptica que modelan cada componente del sistema. La primera matriz involucrada en el producto es  $\mathbf{p}_{source}$ , la asociada a la fuente emisora de luz, que modela su distribución angular de potencia. Por ejemplo, para un sistema formado por un emisor óptico ( $\mathbf{p}_{source}$ ) y un detector (caracterizado por una matriz  $\mathbf{F}$ ) separados por varios tramos de fibra (con matrices de propagación  $\mathbf{M}_{Li}$ ), unidos por conectores ST ( $\mathbf{C}_{ST}$ ), la distribución angular de la potencia de salida para cada frecuencia se calcula como:

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{M}_{L_K}(\omega) \cdot \mathbf{C}_{ST} \cdots \mathbf{M}_{L_2} \cdot \mathbf{C}_{ST} \cdot \mathbf{M}_{L_1}(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source} = \mathbf{L}(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source} = \mathbf{p}_{out}(\omega) \quad (2.4)$$

donde se denomina  $\mathbf{L}(\omega)$  a la matriz que modela el sistema POF completo. En el método de dos pasos,  $\mathbf{p}_{source}$  no tiene dependencia con la frecuencia, ya que las características temporales del transmisor se introducen en el segundo paso, como se puede ver en la Figura 2.4. Considerando el sistema como una caja negra, la señal de salida del enlace se puede calcular a través de la siguiente transformada de Fourier inversa,

$$r(t) = TF^{-1}(S(\omega) \cdot H(\omega)) = TF^{-1}\left(S(\omega) \cdot \int_{\theta=0}^{\pi/2} p_{out}(\theta, \omega) \sin(\theta) d\theta\right) \quad (2.5)$$

donde  $S(\omega)$  es la transformada de Fourier de la señal transmitida. Dado que la integral se calcula a lo largo de la variable angular  $\theta$ , la expresión es equivalente a:

$$r(t) = TF^{-1}\left(\int_{\theta=0}^{\pi/2} S(\omega) \cdot p_{out}(\omega) \sin(\theta) d\theta\right) = TF^{-1}\left(\int_{\theta=0}^{\pi/2} p_{out,s}(\theta, \omega) \mathbf{sen}(\theta) d\theta\right) \quad (2.6)$$



donde se ha introducido la nueva variable,  $p_{out,s}(\theta, \omega)$ , que contiene tanto las características espaciales como temporales de la señal de salida. Se puede calcular usando la ecuación (2.4) como:

$$p_{out,s}(\theta, \omega) = S(\omega) \cdot p_{out}(\omega) = \mathbf{L}(\omega) \cdot S(\omega) \cdot \mathbf{p}_{source} = \mathbf{L}(\omega) \cdot p_{source,s}(\theta, \omega) \quad (2.7)$$

Como se puede observar de esta última expresión, las características temporales (espectro de modulación) de la señal de entrada pueden ser incluidas directamente en el vector que modela la fuente. De esta forma, tanto la información espacial como la temporal serán accesibles en cualquier posición ( $z$ ) del enlace. Esta información permite obtener la señal en el dominio del tiempo en cualquier punto del enlace simplemente con la realización de la transformada inversa de Fourier de la integral a lo largo de la dimensión angular de la distribución de potencia óptica  $\mathbf{p}_{z,s}(\omega)$  obtenida en ese punto.

## 2.2. El entorno Simulink

Simulink es un entorno de simulación de sistemas dinámicos integrado con el lenguaje de programación Matlab y de nivel de abstracción superior que el lenguaje interpretado por éste último. Se basa en la construcción y simulación de diagramas de bloques y es ampliamente usado en Ingeniería por su valor en temas relacionados con el procesamiento de señales, radiofrecuencia, procesamiento de imagen y video, trabajo con señales aeroespaciales o con sistemas de realidad virtual, entre otros. El comportamiento de los sistemas de comunicaciones con los que se va a tratar en este proyecto se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, matrices y códigos Matlab [16-17].

Simulink se lanza desde Matlab, simplemente tecleando la palabra `simulink` en la ventana de comandos. Entonces aparece un menú como el mostrado en la Figura 2.5 en donde se encuentran las librerías de las que dispone y los bloques contenidos en cada una.

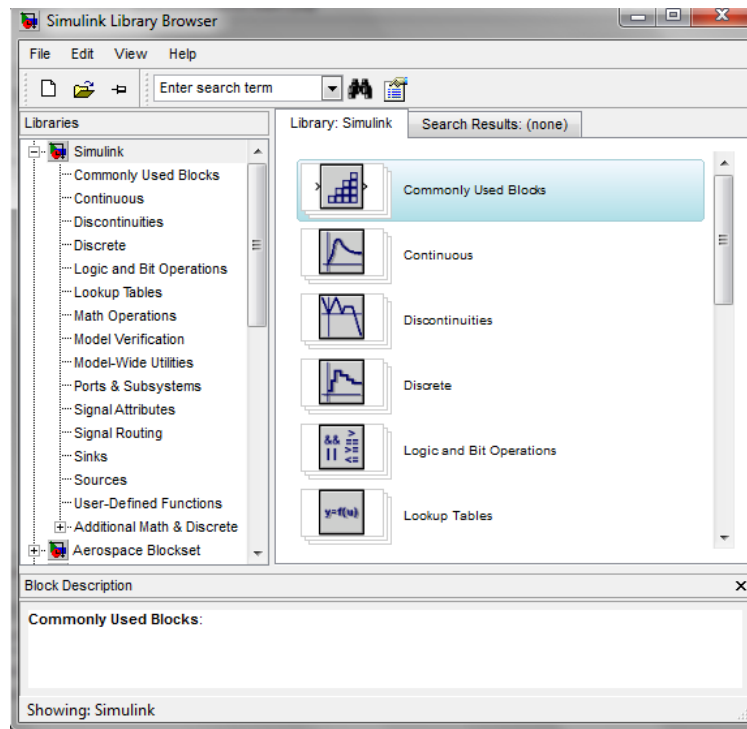


Figura 2.5: Buscador de librerías de Simulink.

### 2.2.1. Bloques personalizados en Simulink: *S-functions*

Una de las librerías disponibles es la llamada *User-Defined Functions* que contiene distintos tipos de modelos que permiten al desarrollador diseñar bloques propios con comportamientos personalizados. El bloque más significativo dentro de esta librería es el denominado *Level 2 mfile S-function* [18]. La principal característica de este bloque es que es programable. Esto es muy importante para la realización de este trabajo ya que se necesita crear una librería propia de bloques que implementen los componentes de un sistema POF porque el programa no dispone de ellos como tal. Este bloque permite utilizar el lenguaje Matlab para crear bloques personalizados con múltiples puertos de entrada y salida y es capaz de manejar cualquier tipo de señal producida por un modelo Simulink. Mediante la edición de la plantilla disponible, que contiene la estructura básica para el funcionamiento del bloque, se consigue que los bloques reflejen el comportamiento deseado.

Estos bloques se comunican con el usuario a través de un cuadro de diálogo en el que se solicitan los parámetros para cada uno. Además, existe la posibilidad de editar una sección de ayuda para estos bloques en la que explicar cómo funciona, y de que aparezca en el propio cuadro de diálogo una breve descripción del mismo, exactamente igual que ocurre con los bloques propios de Simulink.

Cabe destacar que la plantilla para definir los bloques tipo *Level2 mfile S-function* consta de un conjunto de métodos de devolución de llamada (*callback methods*) que Simulink invoca al inicializar, actualizar el modelo o durante la simulación. Los métodos *callback* realizan el trabajo real de la inicialización y el cálculo de las salidas del bloque.

### 2.2.2. Métodos *callback*

La siguiente tabla muestra los diferentes tipos de métodos *callback* que el desarrollador puede personalizar:

<i>Setup</i>	<i>SetInputPortDimensionsModeFcn</i>
<i>CheckParameters</i>	<i>SetInputPortSampleTime</i>
<i>Derivatives</i>	<i>SetInputPortSamplingMode</i>
<i>Disable</i>	<i>SetOutputPortComplexSignal</i>
<i>Enable</i>	<i>SetOutputPortDataType</i>
<i>InitializeConditions</i>	<i>SetOutputPortDimensions</i>
<i>Outputs</i>	<i>SetOutputPortSampleTime</i>
<i>PostPropagationSetup</i>	<i>SetSimState</i>
<i>ProcessParameters</i>	<i>SimStatusChange</i>
<i>Projection</i>	<i>Start</i>
<i>SetInputPortComplexSignal</i>	<i>Terminate</i>
<i>SetInputPortDataType</i>	<i>Update</i>
<i>SetInputPortDimensions</i>	<i>WriteRTW</i>

Tabla 2.1: Métodos *callback* de Simulink

De entre los expuestos, hay algunos métodos que deben existir obligatoriamente para el funcionamiento del bloque, siendo los demás opcionales. Todo bloque *Level 2 mfile S-function* debe contener como mínimo los métodos *Setup*, *Outputs* y *Terminate*. El primero se encarga de la inicialización y configuración de las características del bloque, el segundo de calcular la salida y sacarla por el puerto correspondiente y el tercero realiza cualquier acción requerida en la

terminación de la simulación. El resto de los métodos, como se indicaba anteriormente son opcionales.

El método de configuración (*Setup*) realiza, entre otras, las siguientes tareas:

- Definir el número de puertos de entrada y de salida del bloque.
- Configurar atributos tales como dimensiones o tipos de datos.
- Configurar el número de parámetros que se pedirán al usuario mediante un cuadro de diálogo.

Otros métodos importantes a la hora de programar son:

- *SetInputPortDimensions / SetOutputPortDimensions*: Se usa para definir las dimensiones del puerto de entrada y de salida respectivamente.
- *Start*: Simulink invoca este método al comienzo de una simulación. El método lleva a cabo actividades de inicialización que la *S-function* requiere sólo una vez, como la asignación de memoria o la creación de datos de usuario.
- *PostPropagationSetup*: Se usa para establecer los tamaños de vectores de estado y de trabajo que se necesitan para almacenar datos de forma global y para crear parámetros en tiempo de ejecución (*run-time parameters*). Se invoca este método después de haber determinado la dimensión de los puertos y los tiempos de muestreo de la función. Esto permite dimensionar el tamaño de los vectores de estado y de trabajo basados en el número y tamaño de las entradas y salidas. Se debe implementar este método si se usan los *Dworks*, variables de trabajo que se guardan en memoria y sirven para almacenar datos. Este método establece el número de vectores *Dwork* e inicializa sus atributos.
- *CheckParameters*: Verifica que los parámetros introducidos por el usuario son correctos. Cuando una simulación está en ejecución, pueden ocurrir cambios en los parámetros en cualquier momento ya sea en el inicio o durante una etapa de simulación. Cuando se produce el cambio durante una etapa de simulación, se llama a esta rutina dos veces. La primera durante el paso de simulación se utiliza para verificar que los parámetros son correctos. Después de comprobar los nuevos parámetros, la simulación continúa utilizando los valores de los parámetros originales hasta el siguiente paso de simulación, momento en el cual se utilizan los nuevos valores de los parámetros. En este proyecto no se permite que los parámetros pedidos al usuario cambien en tiempo de simulación, especificando la característica *nontunable* cuando se define el número de parámetros de la función, para evitar falsear los resultados de la simulación. Este método da la opción de acotar el rango de valores de entrada que se consideran válidos, mostrando por pantalla un mensaje de error cuando el parámetro introducido no lo es. Además, se puede incluir una breve descripción del motivo por el que se ha producido el error. En el momento que aparece este mensaje la ejecución de la simulación se detiene hasta que se introduce un valor permitido.

*Setup* llama a estos métodos, que quedarán definidos fuera de este método principal. Como ya se ha mencionado son opcionales, por lo que enriquecen el comportamiento del bloque.

### 2.2.3. Procesado basado en muestras (modo *sample*)

Simulink ofrece dos modos de trabajo o de procesado distintos: modo *sample*, o procesado basado en muestras y modo *frame*, o procesado basado en tramas.

El procesamiento basado en muestras es el modo más básico. Las señales de este tipo son más fáciles de generar a partir de una señal procedente del mundo real. Se puede crear una señal de esta clase muestreando una señal física en una frecuencia de muestreo determinada, obteniendo a la salida cada muestra individual. Cuando se trabaja en este modo, los bloques procesan las señales muestra a muestra. Así, Simulink trata a cada elemento de la señal de entrada como un canal individual del resto. Por ejemplo, desde el punto de vista de modo muestra la siguiente matriz 3x2 contiene seis canales independientes.

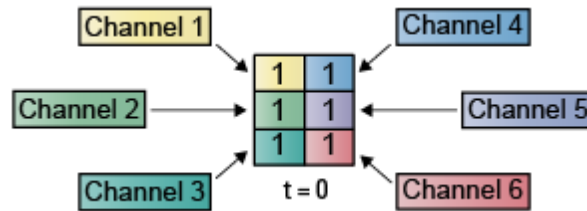


Figura 2.6: Procesado basado en muestras.

En este modo de operación, si la entrada es un escalar, cada bloque la interpreta como una señal de un solo canal. De la misma forma, cada bloque interpreta una matriz de dimensiones  $M \times N$  como una señal multicanal con  $M \times N$  canales independientes. Por ejemplo, en el procesamiento basado en muestras, los bloques interpretan la siguiente secuencia de matrices 3 x 2 como una señal de seis canales.

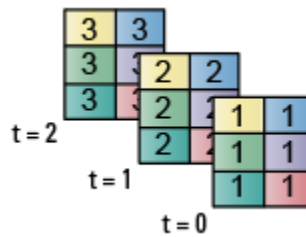


Figura 2.7: Ejemplo de uso de procesamiento basado en muestras.

#### 2.2.4. Procesado basado en tramas (modo *frame*)

Cuando el procesamiento se hace basado en tramas (modo *frame*) las columnas de la matriz de la señal de entrada son tratadas como canales, con lo que el procesamiento se realiza cada número determinado de muestras. Este valor será definido por el programador en función de las necesidades del sistema.

Cada trama de datos contiene muestras secuenciales de un canal independiente. Cada canal está representado por una columna de la señal de entrada. Por ejemplo, desde una perspectiva de procesa basado en tramas, la siguiente matriz de 3 x 2 tiene dos canales, cada uno de los cuales contiene tres muestras.

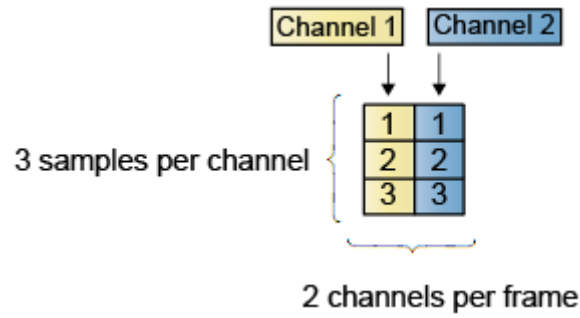


Figura 2.8: Procesado basado en tramas.

Al configurar un bloque para realizar el procesamiento basado en tramas, el bloque interpreta un vector de dimensiones  $M \times 1$  como una señal de un canal que contiene  $M$  muestras por trama. Del mismo modo, el bloque interpreta una matriz de dimensiones  $M \times N$  como una señal multicanal con  $N$  canales independientes y  $M$  muestras por canal. Por ejemplo, en el procesamiento basado en tramas, los bloques interpretan la siguiente secuencia de matrices  $3 \times 2$  como una señal de dos canales con un tamaño de trama de tres.

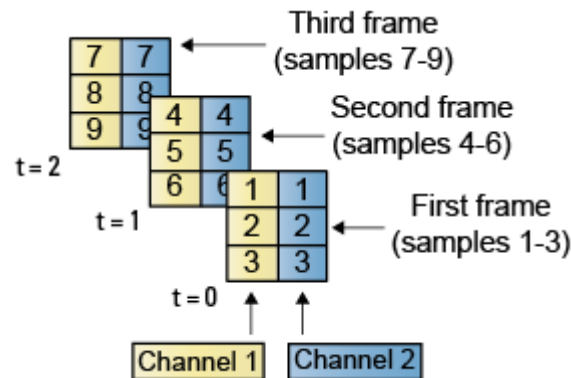


Figura 2.9: Ejemplo de procesamiento basado en tramas.

Usar el procesamiento basado en tramas (modo *frame*) es ventajoso para muchas aplicaciones de procesamiento de señal, ya que trata varias muestras a la vez. Almacenando los datos en tramas, generalmente se mejora el tiempo de computación. Por otra parte, definir los datos en modo basado en tramas es una técnica común en sistemas en tiempo real. Normalmente, el *hardware* de adquisición de datos opera mediante la acumulación de un gran número de muestras de la señal a una velocidad muy alta para luego propagarlas en tiempo real como si fueran un único conjunto de datos. Este tipo de propagación maximiza la eficiencia del sistema mediante la distribución de la sobrecarga de proceso fijo a través de muchas muestras.

Hay que tener en cuenta que el procesamiento basado en tramas introduce un retardo (latencia), debido al desfase temporal inherente a la acumulación de la trama inicial. Este tipo de procesamiento es un método utilizado para acelerar el tratamiento de sistemas en tiempo real y también la simulación de modelos. En nuestro caso, el uso de procesamiento por tramas reducirá la sobrecarga de comunicaciones de bloque a bloque mediante la propagación de tramas de datos en lugar de las muestras individuales, acelerando la ejecución de la simulación.

Cuando se trabaja con bloques de Simulink se puede especificar, bloque a bloque, qué tipo de procesamiento realizar. En la mayoría de los casos, se especifica el modo de procesamiento estableciendo el tipo de la señal de entrada. En nuestro caso, especificaremos en los bloques del subsistema

eléctrico del transmisor el modo de procesamiento deseado e indicaremos en el resto de bloques del sistema que este comportamiento sea heredado de la señal de entrada a cada uno de ellos.

### 2.2.5. Selección del modo de simulación

En este trabajo, se pretende transmitir una señal temporal a través de un sistema de fibra siendo la variable que se propaga entre bloques la matriz de potencia óptica que, como se explicó en el apartado 2.1.3, contiene la información de la señal a través de su transformada de Fourier. Por tanto, en el proceso de construir la matriz de potencia óptica inicial, es necesario agrupar un número de muestras temporales para realizar su transformada de Fourier. Lo cual induce a pensar que las características de los bloques que queremos crear deben trabajar en modo trama. Como ventaja añadida, pero no por ello poco importante, el modo de procesamiento por tramas acelerará la simulación.

Respecto a las particularidades de la implementación, hemos encontrado que todos los bloques tienen la capacidad de trabajar en el modo basado en muestras (modo *sample*) pero no todos cuentan con la posibilidad de trabajar en el modo basado en tramas (modo *frame*). En referencia a este trabajo, los bloques del sistema POF propiamente dicho están configurados para trabajar en modo basado en tramas, mientras que algún bloque correspondiente a la parte eléctrica en el que se ha usado un bloque propio de las librerías existentes, está en modo basado en muestras por la imposibilidad del propio bloque de trabajar en el otro modo, o por la necesidad de procesar esta vez sí, muestra a muestra.

En Simulink, es posible crear señales para trabajar en modo trama a partir de señales en modo basado en muestras. Un bloque clave para esta conversión es *Buffer*, que convierte señales en modo basado en muestras a señales en modo basado en tramas mediante la acumulación de muestras y *Unbuffer*, que hace la conversión inversa. Por tanto, en el esquemático de nuestro sistema POF deberemos incluir bloques asociados a la técnica de simulación en sí, además de los bloques propios y los bloques eléctricos ya existentes.

La necesidad de introducir un *buffer* a la entrada del bloque emisor que realice la agrupación de muestras formando las tramas introduce un problema de borde en los extremos de las mismas. Este problema es únicamente patente en el caso del bloque que modela la fibra, ya que es el único que introduce retardo sobre la señal. La solución se ha encontrado introduciendo un **solape entre las tramas** para evitar que éstas se procesen de forma independiente. De esta manera, repetimos parte de la información que contienen, logrando que el sistema haga los cálculos pertinentes conociendo información de la trama anterior.

La elección del valor de solape entre tramas es importante ya que si no está bien elegido, puede ocurrir que el retardo que introduce la fibra sea superior a este valor y, por lo tanto no se consiga la salida correctamente. Este valor se especifica en muestras, de forma que el número de símbolos de solape  $N_{solape}$  que introducimos se puede obtener fácilmente mediante la siguiente expresión:

$$N_{solape} = solape/sps \quad (2.8)$$

donde *sps* es el valor que se le da en el archivo de los parámetros internos de simulación al número de muestras por pulso; es decir, muestras que hay por símbolo transmitido.

Si consideramos la tasa de transmisión en baudios  $R_s$ , la cantidad de tiempo que supone dicho solape es:

$$t_{solape} = N_{solape}/R_s \quad (2.9)$$

Por último, para encontrar la condición que deben cumplir los parámetros internos de la simulación *solape* y *sps*, buscamos la condición de que este solape temporal introducido sea mayor o igual que el retardo introducido por la fibra:

$$t_{POF} = \frac{L}{c \cdot n_{PMMA}} \quad (2.10)$$

donde se ha asumido que trabajamos con una fibra fabricada en PMMA, siendo  $n_{PMMA} \approx 1.49$  el índice de refracción de este material,  $L$  la longitud de la fibra y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío

Por tanto, la condición que se debe cumplir para eliminar los problemas de borde en el procesado basado en tramas es:

$$t_{solape} \geq t_{POF} \Rightarrow \frac{solape}{sps \cdot R_s} \geq \frac{L}{c \cdot n_{PMMA}} \quad (2.10)$$

de forma que los valores en muestras de las variables *solape* y *sps* están relacionadas mediante la siguiente expresión con la tasa de transmisión y longitud de la fibra:

$$solape/sps \geq 5 \cdot R_s(\text{Gbaud}) \cdot L \quad (2.11)$$

Aplicando esta expresión, se puede saber cuál es el valor máximo para la longitud de los tramos de fibra que se pueden introducir para evitar los errores producidos en los bordes las tramas. Si se deseara usar una longitud mayor de la permitida por estas expresiones, se debería aumentar el tamaño de la trama y/o disminuir el número de muestras por pulso. Con esta medida se conseguiría un aumento en la duración de la trama, por lo que el número de símbolos solapados aumentaría, cumpliéndose la Ecuación (2.11) para longitudes de fibra más grandes.

### 2.2.6. Parámetros introducidos por el usuario

En los bloques *Level 2 mfile S-function* existe la posibilidad de pedir parámetros al usuario mediante un cuadro de diálogo. Esta opción permite hacer el sistema más interesante desde el punto de vista del usuario final, pues modificando estos valores de forma sencilla y rápida consigue la simulación de distintos sistemas. Se debe especificar el número de parámetros que se quiere que sean introducidos por el usuario en el cuadro de diálogo, en el método de configuración (*Setup*). Después hay que indicar ese número de parámetros en la máscara del bloque.

La edición de los bloques permite elegir entre el tipo de parámetro que se le va a pedir al usuario, que se deberá marcar como desplegable, cuadro para editar o elemento para seleccionar, indicando además para cada uno el nombre que aparecerá en el cuadro de diálogo y el nombre de la variable correspondiente. Esta es otra manera, junto con el método *Check Parameters* comentado anteriormente, de hacer más robusta la entrada de parámetros evitando el funcionamiento en caso de que sean erróneos.

Simulink permite el paso de parámetros directamente desde la ventana de comandos de Matlab y también a través de un fichero `.m`, del propio editor del programa. En este proyecto se ha elegido la segunda alternativa por simplicidad y comodidad a la hora de cargar los valores y de realizar cambios. Desde un archivo llamado `parametros` se invocarán éstos, siendo visibles

para todos los códigos como parámetros globales. En este código también se genera el vector de frecuencias con el que se trabajará y las matrices de propagación correspondientes a las fibras. Así, después de que se ejecute este archivo el sistema queda inicializado a falta únicamente de que se introduzcan los valores deseados en los cuadros de diálogo de los bloques.

Mediante el bloque *to workspace* de la librería *sinks* de Simulink, se tienen a disposición las salidas de los bloques intermedios, tanto para ver el valor de la salida como para poder representarla.

En este capítulo se han comentado los aspectos más relevantes de Simulink que se han aplicado a este proyecto fin de carrera. En el Anexo II se explican detalladamente sobre el código de uno de los bloques creados los métodos que se usan, cómo se comunican las variables y otras características de la programación en este entorno de simulación.



# Capítulo 3: INTEGRACIÓN DEL MODELO

## POF EN SIMULINK

En este capítulo se describen con detalle los bloques Simulink creados tanto para el sistema POF en sí como para realizar medidas de interés sobre él, como la potencia transmitida o la obtención del módulo y la fase de la función de transferencia. Además, se explican los elementos incluidos en el sistema para completar la cadena de transmisión y así poder realizar la comprobación de su funcionamiento. Estos elementos conforman la parte eléctrica del transmisor y del receptor y han sido seleccionados del grupo de comunicaciones, dentro de la librería de bloques que ofrece Simulink.

Para realizar una librería POF propia se han desarrollado una serie de bloques que actúan como partes de un sistema de comunicaciones mediante este tipo de fibra. Entre ellos se encuentran emisor, fibra (simula tramos de fibra de un tipo determinado a elegir entre varios modelos disponibles), conector, acoplador y receptor. También se ha desarrollado dentro de la misma librería un apartado dedicado a bloques de medida y representación entre los que se encuentran el medidor de potencia, de ancho de banda, cálculo del retardo de grupo, la representación de módulo y fase de la respuesta frecuencial, representación de la respuesta impulsional o del patrón de campo lejano.

### 3.1. Aspectos generales

Antes de iniciar la simulación de cualquier esquemático se debe ejecutar un archivo llamado `parametros.m` en el que se incluyen los parámetros que se pasarán de forma global a todos los bloques del modelo, tanto para los creados como para los obtenidos de las librerías de Simulink. Gracias a su ejecución inicial, dichos parámetros pasan a estar disponibles en el espacio de variables de Matlab. En el código contenido en este archivo se definen los parámetros que configuran la parte eléctrica del transmisor. Además, también se definen parámetros para el filtro receptor, que se colocará en el caso de un ejemplo real en el que se incluye el ruido, que se verá en el capítulo siguiente. En este código también se calculan los ejes temporales y frecuenciales necesarios para las representaciones gráficas. Además, el eje frecuencial es crucial para la simulación, ya que define una de las dimensiones de la matriz de propagación de la fibra. Se ha de notar que cada vez que se varíe cualquiera de los parámetros involucrados en estas fórmulas, se habrán de generar de nuevo las matrices de las fibras o sino, de obtener resultados, éstos serán erróneos.

La siguiente expresión corresponde con el eje de frecuencias creado para la generación de las matrices características de las fibras:

```
F = linspace(0,(Rs/2*samples)/10e6,(Buffer_Size/2)+1);
```

donde  $R_s$  es la tasa de transmisión en función del número de niveles de la modulación PAM, `samples` es el número de muestras por pulso y `Buffer_Size` es el tamaño de trama. Todos estos parámetros están definidos en el archivo de parámetros.

Como se puede observar, se considera únicamente el semieje positivo de frecuencias, ya que al trabajar con señales reales, es posible eliminar la redundancia de su espectro y así aumentar la eficiencia computacional. En realidad, se añade una muestra a este semieje. Esto es debido a que la muestra central no se ha de replicar a la hora de reconstruir la señal en el receptor a partir de la transformada de Fourier.

## 3.2. Bloques del sistema de transmisión POF

A continuación se describen de forma exhaustiva cada uno de los bloques creados que formarán parte de nuestra librería POF en Simulink. Como ya se ha descrito en el capítulo anterior, con el objetivo de acelerar la simulación estos bloques se diseñan para trabajar con tramas (modo *frame* de Simulink). De esta forma, en cada paso de tiempo de simulación se actualizan las tramas de señal a la salida de cada uno de los bloques.

### 3.2.1. Emisor

Este bloque está en el inicio de la infraestructura POF del sistema de comunicaciones y contiene la información espacial y frecuencial de la fuente óptica. Recibe como entrada un conjunto de muestras, denominado trama, procedente de la parte eléctrica del transmisor. En este proyecto usaremos señales PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) con pulso conformador rectangular. Es posible, sin embargo, usar cualquier otro tipo de modulación y/o pulso conformador. De forma previa al bloque emisor, será necesario disponer de un *buffer* para poder realizar la simulación en modo trama, tal y como se ha explicado en el Capítulo 2. A la salida el bloque devuelve la distribución angular de potencia óptica que, como ya se ha descrito, es la variable que se transmite entre bloques de nuestra librería POF y que se representa mediante una matriz que depende del ángulo de propagación de la luz y de la frecuencia.

En este trabajo se introduce como novedad respecto a estudios anteriores el hecho de poder trabajar con una señal que cambia en tiempo real. Para lograr este propósito, se ha introducido una modificación sobre la matriz de potencia óptica a la salida del emisor, que permite evaluar las prestaciones del sistema POF de forma dinámica. Así, la distribución frecuencial de la señal de salida del emisor se calcula a partir de la señal de datos que se esté transmitiendo en ese momento, tal y como se ha descrito en el Capítulo 2.

La primera tarea a realizar dentro del bloque emisor es una transformada de Fourier de la señal de entrada, que hasta este momento aún están en tiempo, para pasarla al dominio de la frecuencia. Este paso es necesario porque la matriz de potencia óptica contiene la información espacial y temporal (el modelo usa la variable frecuencia) de la señal óptica que se propaga a través del sistema POF. El número de puntos de la transformada de Fourier se hará coincidir con el número de muestras de la trama, parámetro incluido en el *buffer* previo al emisor. A partir de la salida de este primer bloque, el sistema trabaja con la mitad de las muestras de la trama ya que se tiene en cuenta la redundancia que presenta la señal en el dominio de la frecuencia.

La salida de este bloque es la matriz de potencia óptica que se envía al resto de la infraestructura de fibra de plástico. Esta potencia se entrega en formato de matriz, con dimensiones las muestras de la distribución espacial por las muestras de la distribución en frecuencia. Así, en este caso concreto, las filas representan el número de ángulos que se consideran y las columnas el número de frecuencias consideradas.

Para definir la distribución angular de potencia óptica a la salida de la fuente, se deben especificar varios parámetros que serán solicitados al usuario para tener la mayor libertad de simulación posible. Así, se le permite elegir entre la función que define la distribución espacial de la fuente de luz y la tasa de transmisión, orden de la modulación PAM, tamaño de la trama y muestras por pulso. En la Figura 3.1 se muestra el cuadro de dialogo del bloque emisor creado a partir de cuyos parámetros se determina la distribución espacial de la luz emitida.

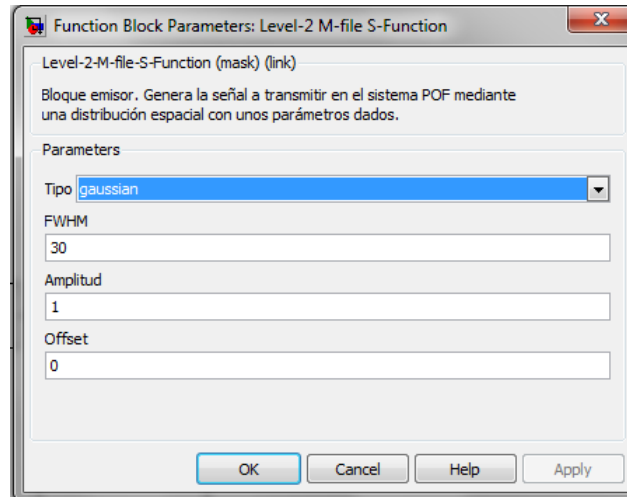


Figura 3.1: Cuadro de diálogo del bloque emisor.

A continuación se presentan a modo de ejemplo las matrices de potencia óptica a la salida del bloque emisor que ponen en relieve la influencia de sus características espaciales y frecuenciales sobre los resultados de simulación. La matriz de potencia óptica se representa como una imagen cuyos ejes son los ángulos de salida medidos en grados y la frecuencia medida en MHz, respectivamente. De esta forma, se puede obtener la distribución espacial de la luz emitida para cada uno de los valores de frecuencia mediante cortes verticales. De forma análoga, la distribución frecuencial para cada uno de los ángulos considerados se puede obtener mediante cortes horizontales.

### Características espaciales del emisor

En el bloque emisor, los parámetros relacionados con la distribución espacial más importantes son la función que describe esta distribución en función del ángulo y los parámetros asociados a dicha función. Como ya se ha comentado, es posible seleccionar distintas funciones para la representación de la distribución angular de la luz emitida por la fuente, si bien la distribución más común es la gaussiana. Por otra parte, el parámetro que nos permitirá obtener el efecto de distintos tipos de fuente (LED, láser,...) es el denominado FWHM (*Full Width at Half Maximum*), que define la anchura de la distribución espacial. En la Figura 3.2 se observa el efecto de este parámetro sobre el módulo de la matriz de potencia óptica y las distribuciones espacial y frecuencial de la luz a la salida del bloque emisor.

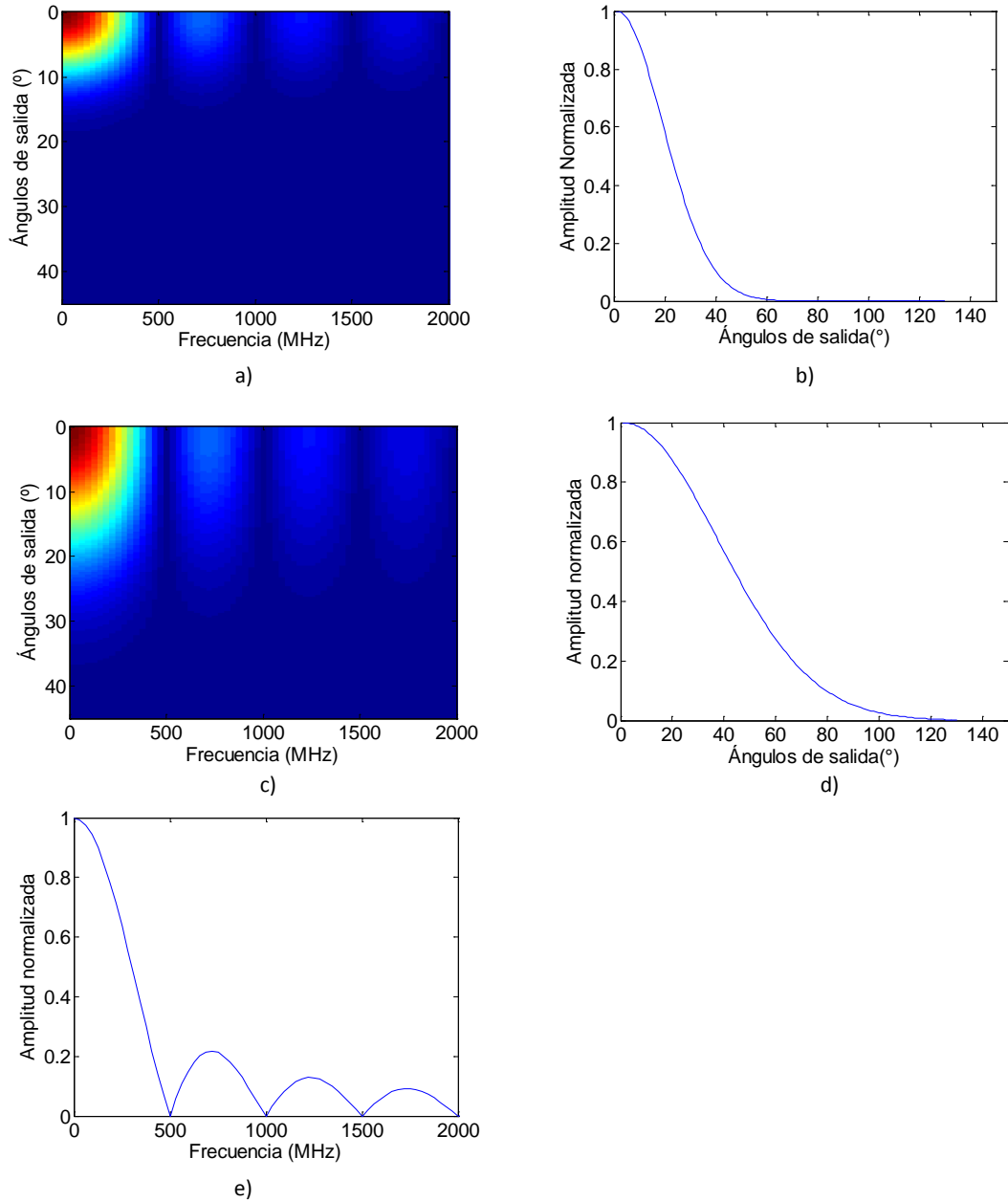


Figura 3.2. Imagen del módulo de la matriz de potencia a la salida del emisor para 500 Mb/s y a) FWHM=15° y c) FWHM=30°, b) Corte espacial del emisor para FWHM=15° y d) FWHM=30°, d) Corte espacial del emisor para e) Corte frecuencial del emisor. Es el mismo para ambos casos.

En particular, se han considerado dos casos de distribución espacial, con valores de FWHM de 15° (imagen superior) y 30° (imagen inferior), que podrían modelar la emisión de luz por una fuente láser y un LED, respectivamente. La distribución frecuencial se ha mantenido fija, transmitiéndose en los dos casos datos con modulación PAM binaria a una tasa de 500 Mb/s. Por otra parte, las gráficas de la derecha y la gráfica inferior han sido obtenidas mediante cortes de las imágenes para obtener la distribución espacial a frecuencia cero y la distribución frecuencial con un ángulo de salida cero, respectivamente. Como se puede observar, la modificación del parámetro FWHM implica una modificación en el rango de ángulos para los cuales a la salida de la fuente hay valores de potencia óptica apreciables.

### Características frecuenciales del emisor

En cuanto a las características frecuenciales, éstas están determinadas a través de la señal temporal proveniente de la parte eléctrica del transmisor, que a su vez viene fijada por los parámetros generales del sistema especificados por el usuario. Fijado el tipo de modulación (PAM binaria) y el pulso conformador (rectangular), la distribución frecuencial depende únicamente de la tasa de transmisión considerada. En la Figura 3.3 se muestran las matrices de potencia óptica a la salida del emisor al variar su distribución frecuencial.

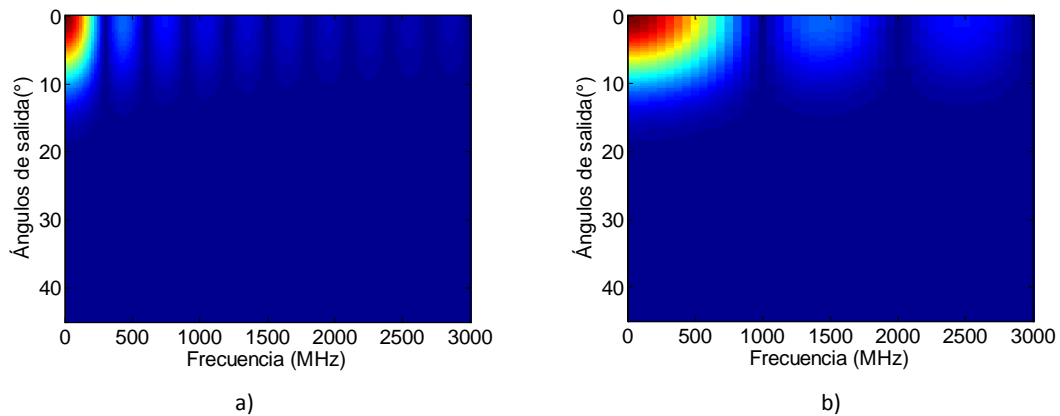


Figura 3.3: Matriz de potencia a la salida del emisor para valores de tasa de transmisión 300 Mb/s a) y 1 Gb/s b).

En concreto, se han obtenido resultados para tasas de transmisión de 300 Mb/s y 1 Gb/s, mientras que la distribución espacial es gaussiana con FWHM de  $15^\circ$ . Como cabe esperar, el primer cero de la distribución frecuencial aparece en el valor de la tasa de transmisión, mientras que los ceros sucesivos aparecen en los múltiplos de dicha tasa de transmisión. Así, el ancho de banda necesario para transmitir los datos a 1 Gb/s es unas 3 veces mayor que el que se requiere para transmitir a 300Mb/s.

#### 3.2.2. Fibra óptica (SI-POF)

Este bloque representa un tramo de fibra óptica de plástico de salto de índice y núcleo de 1 mm de diámetro. La longitud del tramo medida en metros es un parámetro que se pide al usuario mediante un cuadro de diálogo, junto con la elección del tipo de fibra a usar.

Se dispone de varios modelos de fibra que se denominan con los siguientes nombres: GH, HFB, PGU y B1, B2, B3.

- 'GH' es la fibra ESKA PREMIER GH4001 de Mitsubishi
- 'HFB' es la fibra HFBR RUS500 de Hewlett Packard
- 'PGU' es la fibra PGU-CD1001-22-E de Toray
- 'B1', 'B2', 'B3' son otros tipos de SI POF, en concreto los proporcionados por la empresa Boeing por ser los candidatos a introducirse en sus aviones.

Como ya se ha descrito en el Capítulo 2, cada fibra se caracteriza en el modelo mediante una matriz de propagación que llamamos  $M$ , que contiene la información espacial y temporal necesaria para describir la propagación de la luz a lo largo de la misma.

Las matrices características para los 6 modelos de fibra de que se dispone se generan a partir de un archivo Matlab que llama a una función `genallfibers.m`, que a su vez llama a la función `fibergen.m`. Estos códigos acceden a medidas experimentales realizadas sobre las fibras y estiman las matrices de atenuación y difusión (ver Capítulo 2) guardando finalmente las matrices  $M$  en ficheros con extensión `.mat`. El usuario llama a la primera función invocándola con los parámetros eje de frecuencia en MHz ( $F$ ) y eje de ángulos ( $x$ ) con los que se va a trabajar. Es importante destacar que debido a su dependencia con la posición y con la frecuencia, si alguno de éstos o los dos cambian, deberán volver a generarse dichas matrices ya que si no, aparecerán errores de correspondencia de dimensiones o los resultados obtenidos no serán válidos.

Debido a que se trabaja con tramas independientes (modo *frame* de Simulink), para poder obtener la salida correctamente se ha introducido en el *buffer* situado antes del emisor un solape entre las tramas que evita efectos de borde, como ya se indicó en el Capítulo 2. Después de probar varios valores se ha elegido solapar la mitad del tamaño de trama porque se ha comprobado que es un valor suficiente para que desaparezcan este tipo de errores.

A la entrada de este bloque está la matriz de potencia óptica de salida del bloque anterior, pudiendo ser éste el emisor óptico, un conector o un acoplador, puesto que al haber creado una librería propia con los bloques independientes, el usuario puede configurar el sistema a la medida de sus necesidades. A la salida se obtiene una matriz de potencia óptica en la que se han incluido los efectos espaciales y temporales que la fibra ha introducido sobre la matriz de potencia óptica de entrada. Esta matriz de potencia óptica está formada por números complejos ya que se modelan tanto los efectos de atenuación de la fibra como de retardo introducido por la misma (módulo y fase).

En la Figura 3.4 se muestra el cuadro de diálogo con los parámetros del bloque de fibra creado. Después de una breve explicación sobre el bloque, se pide al usuario que seleccione el tipo de fibra a usar y que introduzca el valor de la longitud del tramo que desea expresada en metros.

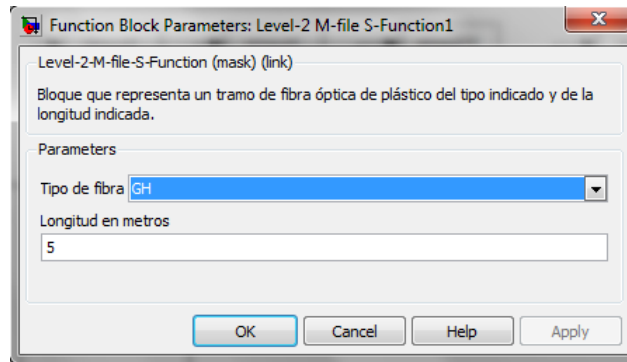


Figura 3.4: Cuadro de diálogo del bloque fibra.

A continuación se presentan las imágenes del módulo de las matrices de potencia óptica a la salida del bloque de fibra para distintos modelos de fibra y distintas longitudes. En concreto, en la Figura 3.5 a) y b) se muestran resultados para la fibra GH de Mitsubishi, mientras que en la Figura 3.5 c) y d) se muestran resultados para la fibra B1 de Boeing.

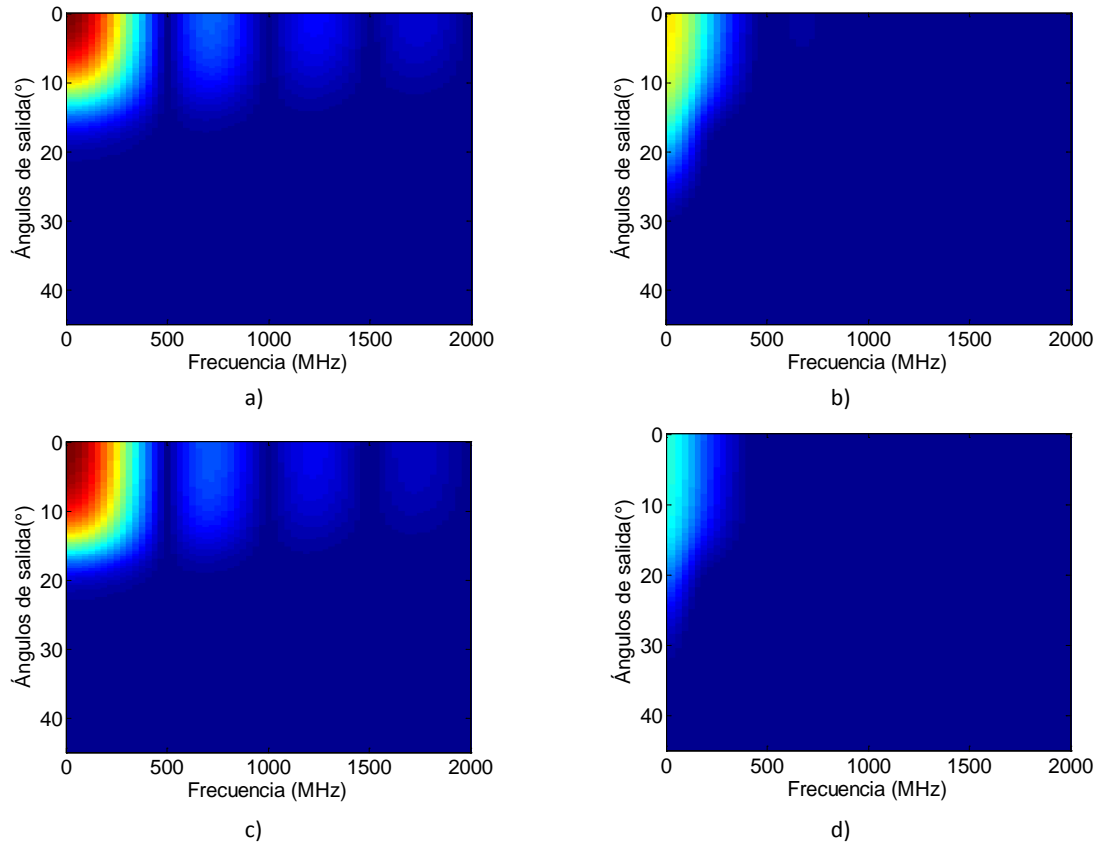


Figura 3.5: Matriz de potencia a la salida de la fibra GH con a)  $L=10\text{m}$  y b)  $L=40\text{m}$ ; c) Matriz de potencia a la salida de la fibra B1 de Boeing con c)  $L=10\text{m}$  y d)  $L=40\text{m}$ .

En cuanto a las longitudes consideradas, las imágenes de la izquierda se corresponden con fibras de 10m, mientras que las imágenes de la derecha se corresponden con fibras de 40m. Estos resultados ponen de manifiesto la atenuación que introduce la fibra. Así, comparando las dos fibras que se exponen, la GH atenúa un poco más que la B1. En cuanto al efecto de la fibra sobre las dimensiones espacial y frecuencial, éstos también son apreciables en las gráficas anteriores.

Así, en el eje de la frecuencia se aprecia que la fibra tiene un comportamiento paso bajo, introduciendo un filtrado en las frecuencias altas. Respecto a la distribución angular de potencia se aprecia un ensanchamiento debido al acoplo modal que provoca el aumento relativo de potencia de los modos que se propagan con ángulos altos.

### 3.2.3. Conector

Este bloque representa un conector para fibra óptica de plástico. Al usuario final se le pide introducir mediante un cuadro de diálogo el tipo de conector del que se trata (que elegirá de los disponibles en un desplegable) y el valor de los desalineamientos que pueden aparecer, axial y longitudinal, expresados en micrómetros.

La Figura 3.6 muestra imágenes de dos extremos de POF en las que se pueden apreciar los tipos de desalineamientos más habituales. El desalineamiento axial es un desajuste lateral entre dos tramos de fibra. Cuanta más separación haya entre los ejes de ambas fibras, menor cantidad de luz se transfiere. El desalineamiento longitudinal hace referencia a la separación que existe entre los dos tramos de fibra. Cuando se hacen empalmes, los extremos de la fibra deben estar en contacto; cuanto más alejados estén, la pérdida de luz será mayor. Se consideran acotados los

valores de los desalineamientos; el axial en el intervalo (0 – 750  $\mu\text{m}$ ) y el longitudinal en (0 – 1000  $\mu\text{m}$ )

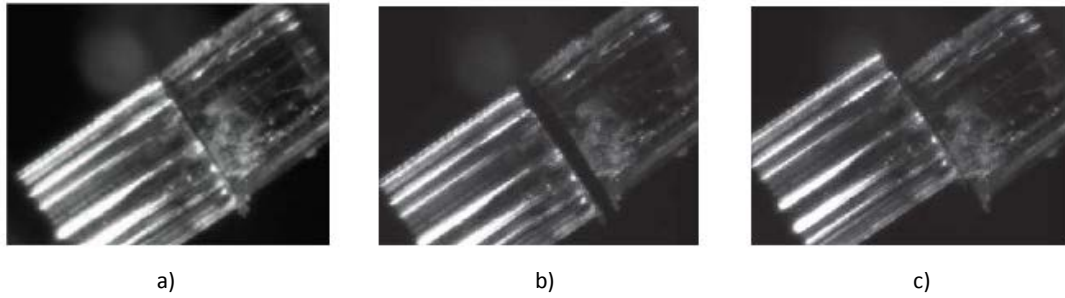


Figura 3.6: Conector a) sin desalineamientos, b) con desalineamiento longitudinal y c) con desalineamiento axial.

Se dispone de modelos para distintos tipos de fibra y conectores, así como para distintos procesos de terminación, básicamente sin pulido y con pulido. A continuación se listan los modelos disponibles:

- 'VL\_EAA' es conector VersaLink (VL) con fibra suministrada por Boeing, sin pulido
- 'ST\_EAA' es conector tipo ST con fibra suministrada por Boeing, sin pulido
- 'VL\_GH', 'ST\_GH' son conectores VL/ST con fibra GH, sin pulido
- 'VL\_PGU', 'ST\_PGU' son conectores VL/ST con fibra PGU, sin pulido
- 'VLp\_EAA', 'STp\_EAA' son conectores VL/ST y fibra Boeing, con pulido
- 'VLp\_GH', 'STp\_GH' son conectores VL/ST y fibra GH, con pulido
- 'VLp\_PGU', 'STp\_PGU' son conectores VL/ST y fibra PGU, con pulido

De acuerdo al modelo matricial, desarrollado inicialmente para fibras de plástico, es posible también describir el efecto del conector mediante una matriz de pérdidas denominada matriz del conector,  $MC$ . Esta matriz es cuadrada, y sus dimensiones se corresponden a los ángulos de entrada y ángulos de salida considerados para calcular la distribución espacial de potencia óptica. Las matrices de conector de acuerdo a los distintos modelos de que se dispone se encuentran guardadas en archivos Matlab de extensión .mat. Como en el caso de la fibra, en caso de que el vector de ángulos cambiara, estas matrices deberían generarse de nuevo ejecutando el archivo `ConnectorMat.m`, que a su vez carga datos obtenidos de forma experimental en otros trabajos anteriores. Como salida de este bloque se obtiene la matriz de potencia óptica de entrada, modificada por las pérdidas que introduce el conector a causa de los desalineamientos.

Además, existen dos modelos para los distintos tipos de conector. El más sencillo es el que denominamos **modelo escalar**, según el cual las pérdidas introducidas por el conector son idénticas independientemente del ángulo en que se propague la luz. El más realista es el denominado **modelo vectorial** que tiene en cuenta la dependencia angular de las pérdidas introducidas por los conectores. En este código, las pérdidas del conector no se modelan usando un valor único para todos los ángulos, sino que se usa un vector de pérdidas en el que cada elemento se corresponde con cada ángulo. Al igual que en el caso del conector simple, al usuario se le demanda el tipo de conector a usar y el valor de los desalineamientos comentados anteriormente. El cuadro de diálogo asociado al bloque conector se muestra en la Figura 3.7.



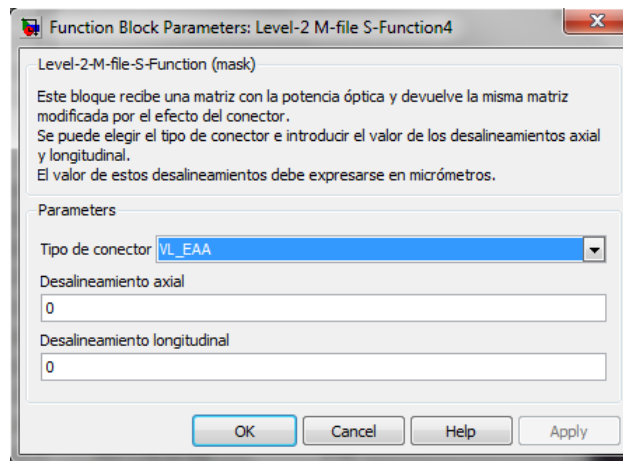


Figura 3.7: Cuadro de diálogo del bloque conector (modelo escalar o modelo vectorial).

La Figura 3.8 muestra las imágenes correspondientes a las matrices ópticas a la salida del conector para distintos tipos de desalineamientos. Así, en la primera imagen se muestra la salida del bloque conector en el caso de no haber desalineamientos, mientras que en las dos imágenes siguientes se prueba el resultado con desalineamiento axial y longitudinal.

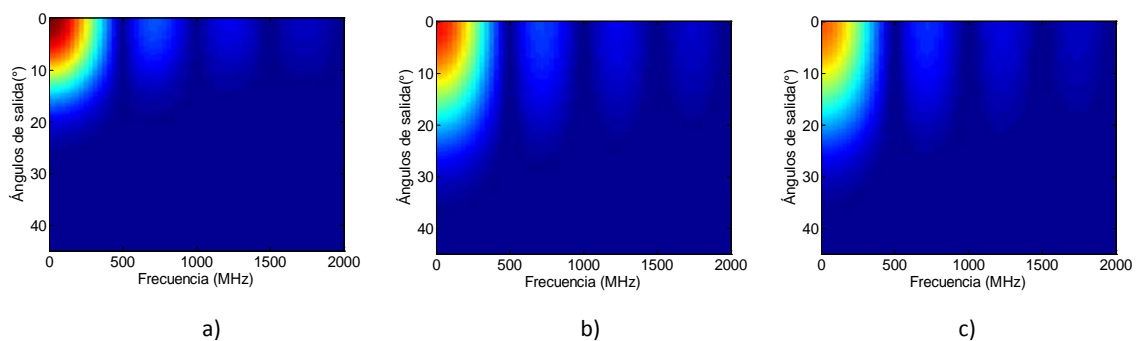


Figura 3.8: Matriz de potencia a la salida del conector VL\_EAA: a) Sin desalineamientos; b) Con 250µm de desalineamiento axial; c) Con 750µm de desalineamiento longitudinal.

Se observa que tiene mayor efecto el desalineamiento axial que el longitudinal, ya que atenúa más la potencia respecto del caso inicial sin desalineamientos. En cuanto al efecto sobre la dimensión frecuencial, el modelo escalar no lo tiene en cuenta, mientras que para el modelo vectorial la degradación producida a altas frecuencias es muy leve y difícil de observar en estas gráficas.

### 3.2.4. Acoplador

Este bloque representa el modelo de un acoplador ideal que únicamente tiene en cuenta las pérdidas de inserción que introduce. En el cuadro de dialogo del bloque, mostrado en la Figura 3.9, el usuario puede seleccionar el tipo de acoplador a usar (por el momento solo está disponible el ideal). Además debe introducir el valor de las pérdidas expresadas en decibelios. La salida de este bloque es la matriz de potencia de entrada modificada por estas pérdidas.

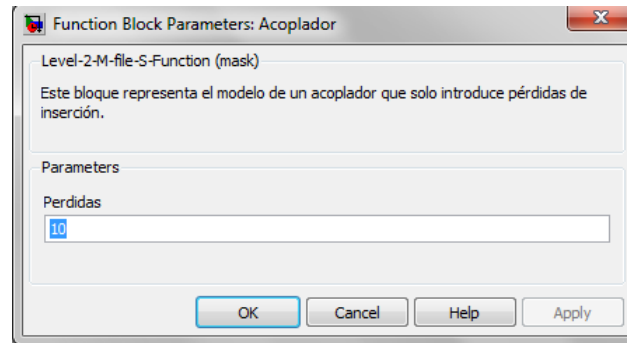


Figura 3.9: Cuadro de diálogo del bloque acoplador.

A modo de ejemplo, la Figura 3.10 muestra las imágenes del módulo de la potencia óptica a la salida del acoplador para 3 valores distintos de pérdidas de inserción.

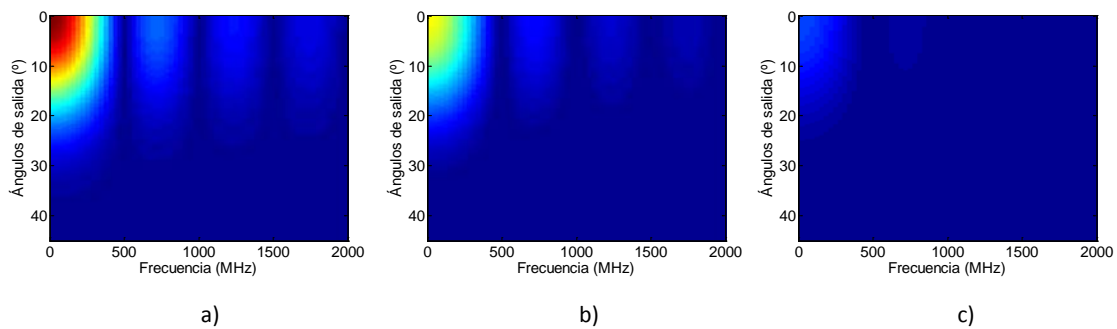


Figura 3.10: Imagen de la matriz de potencia a la salida del acoplador con pérdidas de: a) 0dB, b) 5 dB y c) 10 dB.

En las imágenes se ve que la potencia disminuye en función de las pérdidas que se introducen en el acoplador. Este bloque solo introduce atenuación sin afectar a las características frecuenciales ni a las espaciales.

### 3.2.5. Receptor

El receptor óptico que ha sido integrado en la librería POF creada modela el comportamiento espacial de un fotodetector, que es capaz de recibir más o menos potencia óptica según el tamaño de su área. Este bloque es el encargado de terminar el enlace de fibra de forma previa a la conversión de la señal al dominio eléctrico. Así, de forma habitual recibe como entrada la potencia óptica procedente del bloque de fibra óptica. El receptor se especifica mediante un ángulo máximo que indica el rango de ángulos de captación del fotodiodo, de aquellos con los que la luz sale de la fibra.

En este trabajo se plantean dos salidas para el bloque, una como en el caso del resto de los bloques con la matriz de potencia óptica resultante y otra con la señal de salida expresada en tiempo. Ésta es la señal que se pasa a la parte eléctrica del receptor, donde se filtra, se muestrea y se realiza la decisión de los símbolos.

Así, para calcular la matriz de potencia óptica a la salida de este bloque simplemente se realiza un filtrado paso bajo ideal en la dimensión espacial de acuerdo al máximo ángulo para el que el receptor es capaz de aceptar luz. A partir de esta potencia óptica filtrada espacialmente debemos realizar la reconstrucción de la señal para poder devolverla correctamente al dominio temporal según se ha explicado en el Capítulo 2. También se deshace aquí el efecto del solape entre las tramas introducido en el *buffer* de entrada al sistema POF. Al rechazar la mitad de cada

trama por estar ésta duplicada, el número de símbolos que se obtendrán a la salida del receptor eléctrico es la mitad de los que se envían en cada instante de simulación. Debido a esto, habrá que ralentizar la tasa de los símbolos generados para poder comparar ambas señales.

La Figura 3.11 muestra el cuadro de diálogo del bloque receptor creado que permite introducir su máximo ángulo de detección. La respuesta en frecuencia del receptor se ha elegido plana, de forma que se reciban todas las frecuencias sin filtrar ninguna.

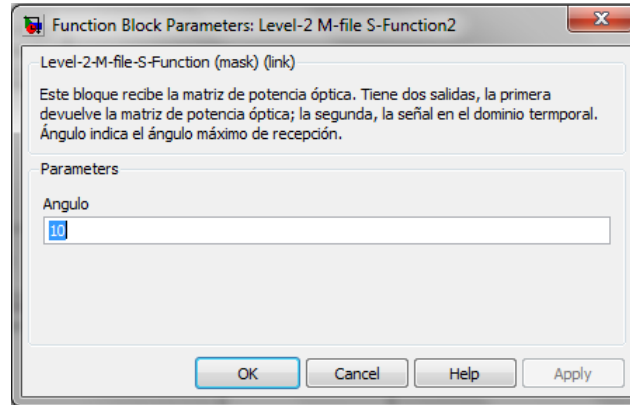


Figura 3.11: Cuadro de diálogo del bloque receptor.

En la Figura 3.12 se muestra la matriz de potencia óptica a la salida del receptor para distintos características espaciales del mismo. En concreto se han considerado ángulos de recepción máximos de 5°, 15° y 30° que estarían asociados con fotodetectores de áreas con valores crecientes.

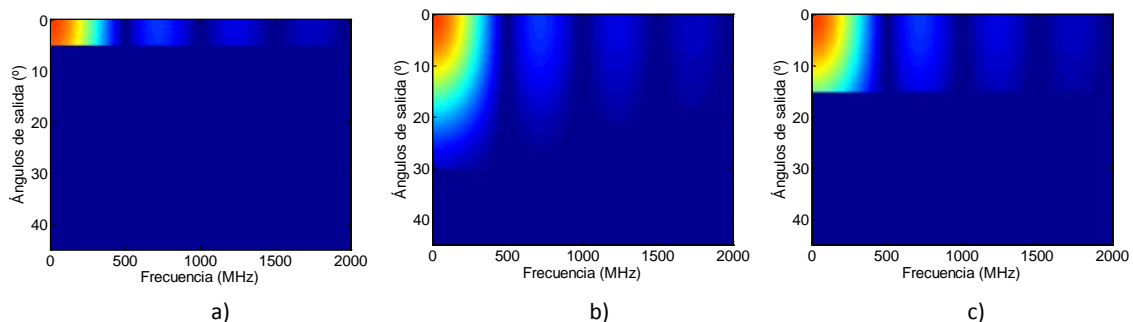


Figura 3.12: Imagen de la matriz de potencia a la salida del receptor: a) ángulo de recepción 5° b) ángulo de recepción 15° c) ángulo de recepción 30°.

En las imágenes queda patente que el receptor actúa como un filtro espacial paso bajo ideal especificado a través del máximo ángulo de recepción. Así, podemos concluir que para detectores de área grande se recibe toda la potencia óptica entregada por la fibra. Además del área del detector, las variaciones de este ángulo máximo también pueden describir la distancia entre el extremo final de la fibra y el detector. En este caso, el ángulo máximo de recepción disminuirá al aumentar la distancia fibra-detector, de forma que es deseable que esta distancia sea lo más pequeña posible para evitar pérdidas adicionales.

### 3.3. Bloques de medida y representación

En esta sección del capítulo se describen los bloques que se han creado con la finalidad de realizar representaciones y medidas sobre el sistema POF que pueden resultar de utilidad para el usuario.

### 3.3.1. Medidor de potencia

Este bloque recibe como entrada la matriz de potencia óptica a la salida de cualquiera de los bloques del enlace POF y como salida devuelve el valor promedio de potencia óptica que se propaga. Al usuario se le permite seleccionar la unidad en la que se devuelve dicho valor de un desplegable con varias opciones.

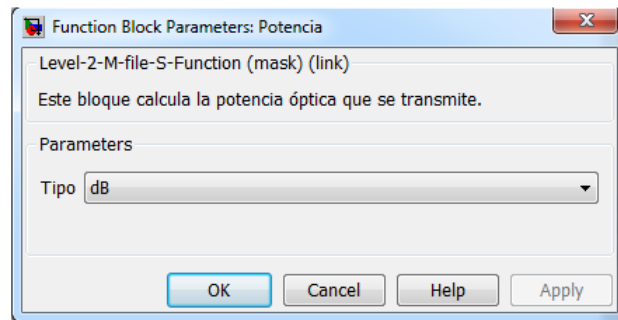
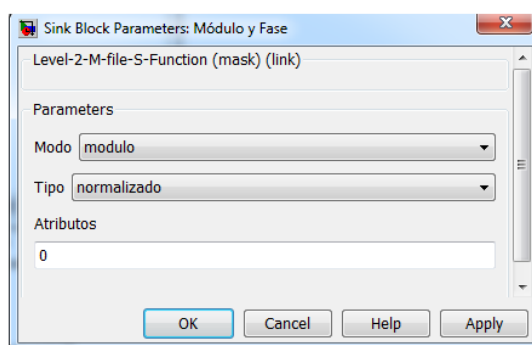


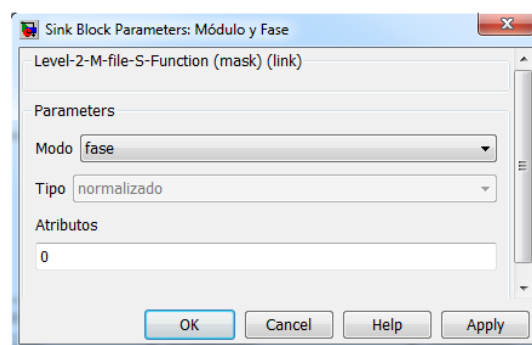
Figura 3.13: Cuadro de diálogo del bloque medidor de potencia.

### 3.3.2. Respuesta frecuencial equivalente

Este bloque representa el módulo y la fase de la respuesta frecuencial equivalente asociada a un bloque, varios o del sistema POF completo. Recibe dos entradas: por una parte, la matriz de potencia óptica a la entrada del fragmento de sistema a medir y por otra la matriz de potencia óptica de salida del mismo fragmento. El bloque calcula la función de transferencia para la entrada y la salida seleccionadas y representa su módulo o su fase. El usuario puede seleccionar cuál de los dos quiere representar. En función de esta elección se mostrarán los cuadros de diálogo incluidos en la Figura 3.14, a través de los cuales se permite elegir el tipo de representación de una lista desplegable el tipo de representación, lineal, lineal y normalizado, en escala logarítmica (en dB) o logarítmico y normalizado en el caso del módulo. Esto es posible incluyendo en la máscara del bloque una función que indica qué parámetros y en qué circunstancias tienen que ser visibles. En el parámetro atributos se permite indicar por ejemplo en qué color quiere realizarse la representación. En caso de indicarse un cero, la representación tiene el aspecto por defecto que usa Matlab.



a)



b)

Figura 3.14: Cuadro de diálogo del bloque de representación de la respuesta frecuencial equivalente, para a) seleccionar representación del módulo y b) seleccionar la representación de la fase

### 3.3.3. Retardo de grupo

Este bloque representa el retardo de grupo introducido por un bloque, varios o por el sistema POF completo, a partir de la fase de la respuesta frecuencial del sistema. Al usuario se le permite elegir opciones para el cálculo de la derivada. Actualmente solo se dispone del cálculo mediante *splines*. Esta función realiza una interpolación cúbica de los datos. También se permite elegir editar los atributos de la gráfica, por ejemplo, el color de la representación a través del parámetro opciones, tal y como muestra el cuadro de diálogo de la Figura 3.15. Devuelve una figura con la representación del retardo de grupo frente a la frecuencia en MHz.

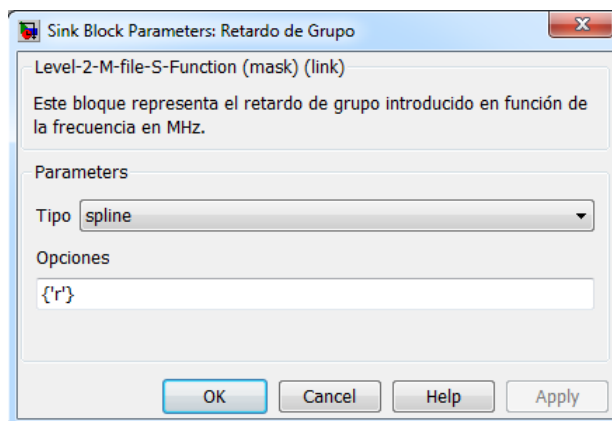


Figura 3.15: Cuadro de diálogo del bloque que representa el retardo de grupo.

### 3.3.4. Respuesta impulsional equivalente

Este bloque representa la respuesta impulsional de un bloque, varios o del sistema POF completo. Recibe dos entradas, la matriz de potencia óptica de entrada y la de salida del fragmento considerado. En su cuadro de diálogo, mostrado en la Figura 3.16, se permite al usuario elegir opciones sobre el cálculo de dicha respuesta, obteniendo la respuesta promediada con un filtro o normalizada. También se permite elegir editar los atributos de la gráfica, por ejemplo, el color de la representación a través del parámetro opciones. Devuelve una figura con la representación de la respuesta impulsional frente al tiempo en microsegundos.

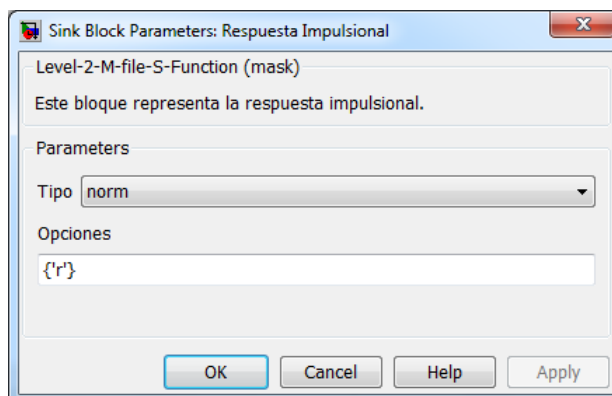


Figura 3.16: Cuadro de diálogo del bloque que representa la respuesta impulsional equivalente.

### 3.3.5. Patrón de campo lejano

Este bloque representa el patrón de campo lejano (FFP, *Far Field Pattern*) que da cuenta de la distribución espacial de la potencia óptica a la salida de la fibra. Recibe como entrada la matriz de potencia óptica a la salida de algún tramo de POF. El usuario elegirá el tipo de representación de los disponibles en un desplegable (ver Figura 3.17), de entre las que se encuentran la representación lineal, lineal y normalizada, logarítmica (en dB) o logarítmica normalizada. También se permiten elegir los atributos de la gráfica, como el color en el que realizar la representación a través del parámetro opciones. Devuelve una figura con la representación del patrón de campo lejano.

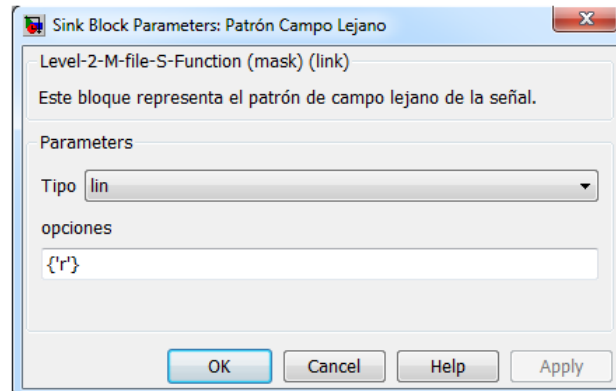


Figura 3.17: Cuadro de diálogo del bloque de representación de FFP.

### 3.3.6. Medidor de ancho de banda

Este bloque mide el ancho de banda a 3 dB expresado en MHz. Recibe como entradas la señal de potencia de entrada al bloque y la salida del mismo. Si el ancho de banda es mayor que la máxima frecuencia considerada en la simulación, el resultado que el bloque muestra en el *display* de salida es NaN (*Not a Number*), y muestra un mensaje en la ventana de comandos de Matlab indicando este hecho. Este bloque no tiene cuadro de diálogo ya que no tiene parámetros que introducir por el usuario.

## 3.4. Componentes eléctricos

En esta sección se detallan los subsistemas correspondientes a la parte eléctrica de transmisor y receptor que se han construido para probar el correcto funcionamiento de la librería POF desarrollada.

### 3.4.1. Subsistema en el transmisor

En la Figura 3.18 se muestra el subsistema que se ha implementado para simular la parte eléctrica del transmisor. Consta inicialmente de un bloque que genera una secuencia pseudoaleatoria que se modula en amplitud y pasa por un filtro conformador rectangular. Posteriormente, esta señal atraviesa un *buffer* en el que se forman las tramas que entran al bloque emisor. A continuación se detallan cada uno de los bloques mencionados.

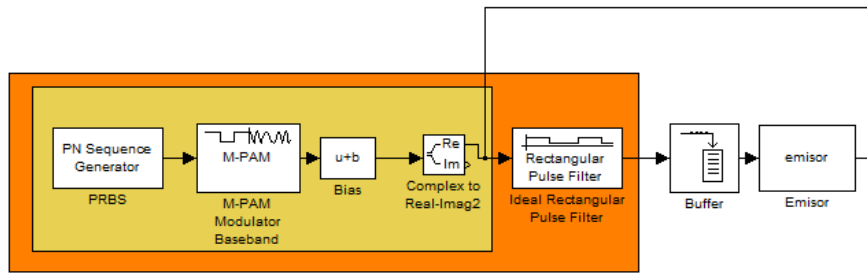


Figura 3.18: Esquemático de la parte eléctrica del transmisor.

Este subsistema eléctrico del transmisor tiene como finalidad generar la señal que se va a transmitir por el sistema. Ésta se genera a partir de una **secuencia pseudoaleatoria** creada por un bloque predefinido por Simulink donde se le suministran como parámetros la tasa de transmisión, estipulada por el usuario en el archivo `parametros.m` y una secuencia de arranque inicial formado por ceros y unos que el bloque utiliza para crear la secuencia que será usada como señal a transmitir. En la siguiente figura se muestra el cuadro de diálogo del bloque generador de esta secuencia pseudoaleatoria.

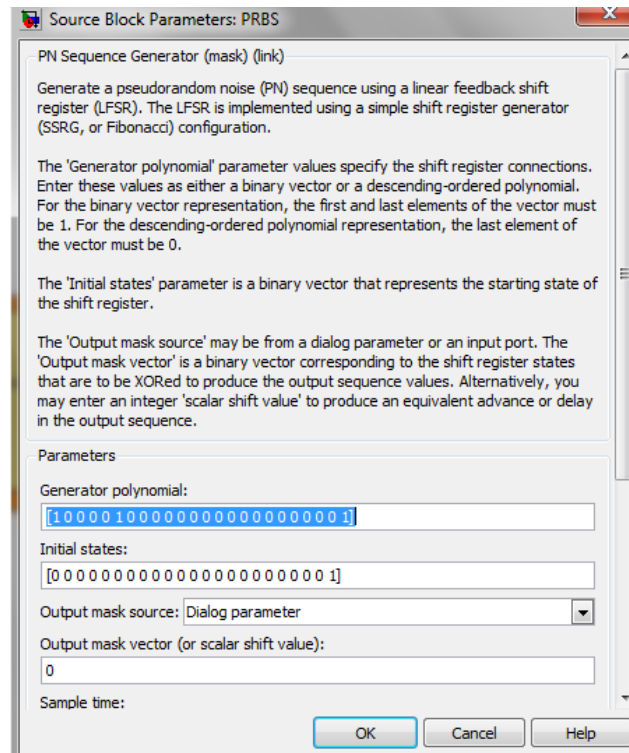


Figura 3.19: Cuadro de diálogo del bloque que genera la secuencia pseudoaleatoria.

En la Figura 3.20 se representa la señal pseudoaleatoria generada por este bloque. Según el polinomio generador que se introduzca la señal será distinta, de forma aleatoria. Esta secuencia es la que se considera como conjunto de símbolos y será transmitida por el sistema para comprobar si su funcionamiento es correcto.

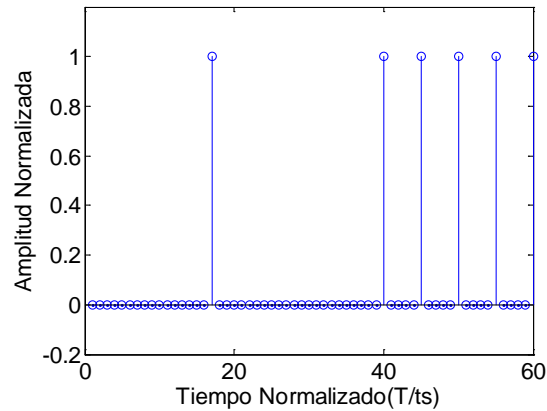


Figura 3.20: Fragmento de la salida del bloque generador de la secuencia de entrada.

Esta señal se pasa por un **modulador PAM** (*Pulse Amplitude Modulation*). En esta modulación la amplitud de la señal es la que varía en función del símbolo a transmitir. El número de niveles de la modulación es un dato presente en el archivo de los parámetros. Así, en función del número de niveles ( $M$ ), se realizará una asignación o mapeo de los valores binarios del bloque anterior a las amplitudes adecuadas.

En la Figura 3.21 se muestra el cuadro de diálogo del bloque genera la señal modulada. El número de niveles se introduce mediante el parámetro  $M$ , cuyo valor se encuentra en el archivo con los parámetros eléctricos del sistema. En la Figura 3.22 se representa la señal PAM binaria a la salida del bloque modulador.

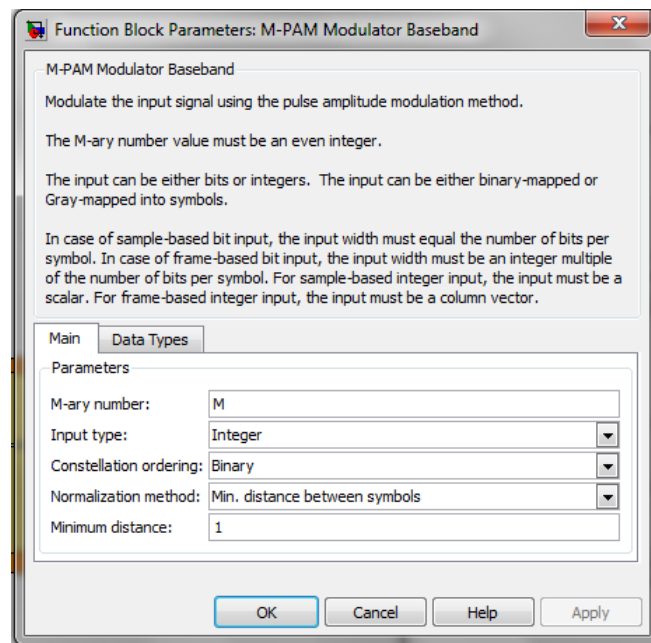


Figura 3.21: Cuadro de diálogo del bloque modulador PAM.



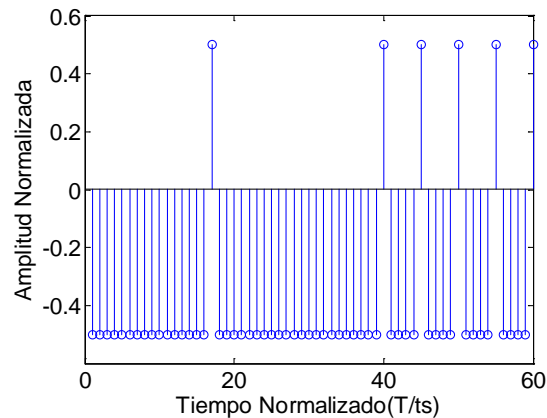


Figura 3.22: Fragmento de la salida de la modulación PAM para  $M=2$ .

Después, la señal pasa por un **filtro conformador**, para el cual el usuario final puede decidir el número de muestras con que se crean los pulsos. En los ejemplos mostrados en esta memoria se han usado pulsos rectangulares, si bien hemos comprobado que es posible añadir otras formas de pulso, como por ejemplo pulsos tipo coseno realzado, que también están incluidos en el grupo de comunicaciones de la librería estándar de Simulink. En su cuadro de diálogo, el filtro conformador permite seleccionar el modo de trabajo que se va a utilizar (ver Figura 3.23). Para este proyecto se ha elegido el procesado por tramas, por lo explicado en el capítulo anterior. A partir de este punto, al resto de los bloques se les indica que hereden el modo de trabajo del bloque predecesor, por lo que todos trabajan por tramas. Gracias a este modo de trabajo se consigue acelerar la simulación, y por tanto, la obtención de resultados.

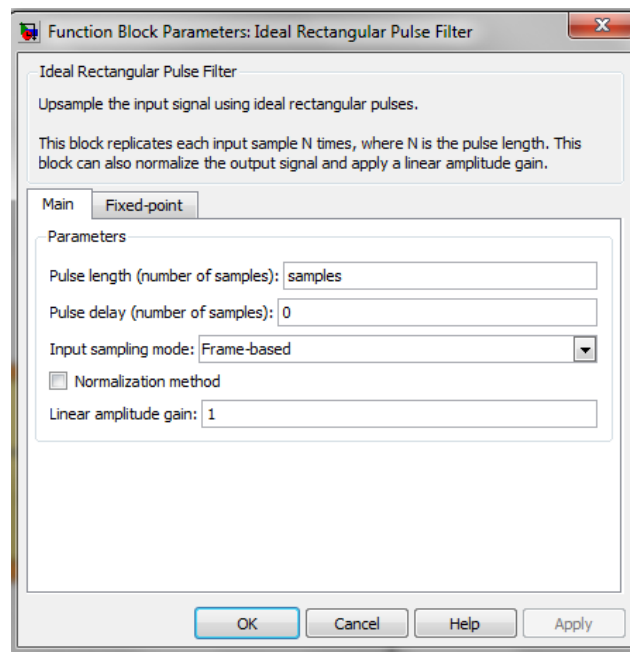


Figura 3.23: Cuadro de diálogo del filtro rectangular del transmisor.

En la Figura 3.24 se representa la señal de salida del bloque que realiza la conformación con pulso rectangular en un intervalo determinado de tiempo. En este caso, se representa la señal asociada a una tasa de transmisión de 100Mb/s

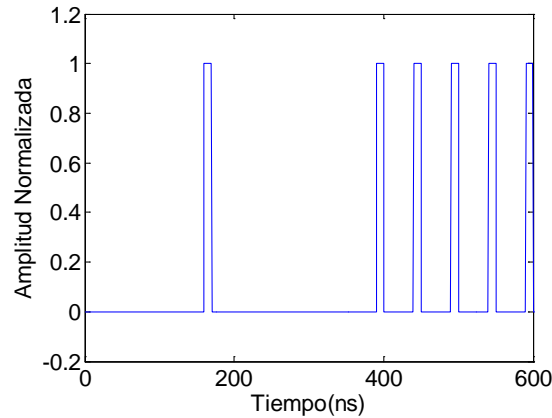


Figura 3.24: Fragmento de la salida del filtro rectangular en el transmisor

La señal conformada entra en un **buffer** previo al emisor en el que se van acumulando muestras hasta ir completando tramas en las que se introduce el solape mencionado en el apartado 3.2.2 sobre el bloque de fibra. Su salida es la entrada del bloque emisor creado.

En la Figura 3.25 se presenta el cuadro de diálogo del **buffer** que se coloca a la entrada del bloque emisor. Se acumulan tantas muestras como el tamaño de trama que se indica en el archivo de parámetros. En la configuración del bloque se añade el valor del solape mencionado en la descripción del bloque de fibra. Este valor, como se ha dicho antes, se elige como la mitad del tamaño de trama por ser suficiente para evitar los que el retardo que introduce la fibra óptica sea demasiado grande, impidiendo la correcta reconstrucción de la señal original.

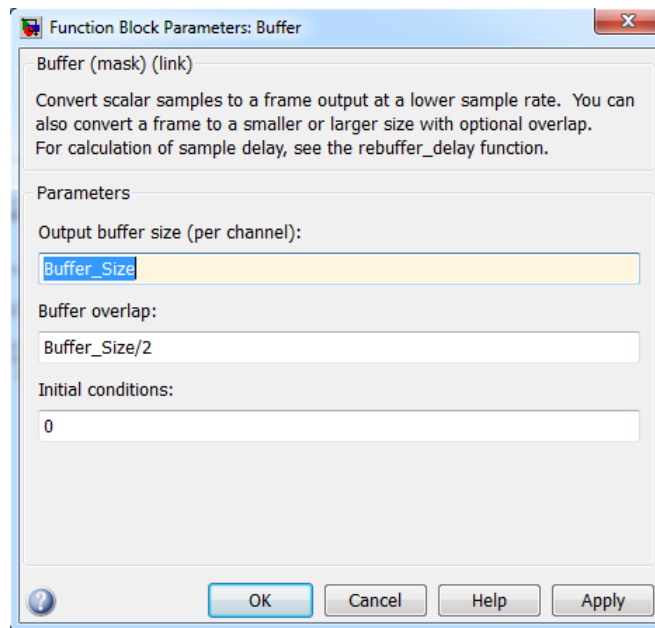


Figura 3.25: Cuadro de diálogo del buffer de entrada al emisor.

### 3.4.2. Subsistema en el receptor

Este subsistema se encuentra ubicado al final de la cadena de transmisión, después del enlace POF creado por el usuario. Su finalidad es muestrear y tomar decisiones sobre la señal eléctrica entregada por el receptor POF así como tomar medidas de las prestaciones del sistema.

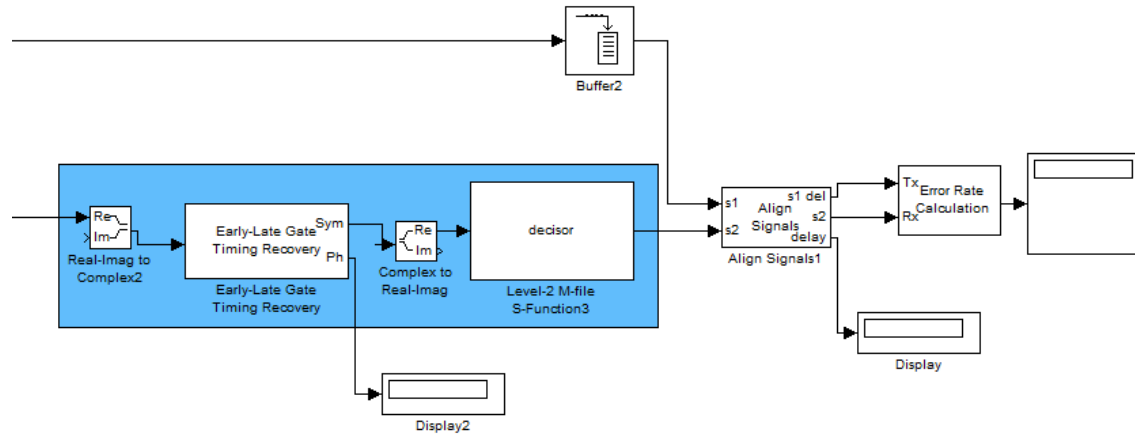


Figura 3.26: Subsistema receptor eléctrico.

Como se ve en la Figura 3.26, este subsistema está formado por un bloque que transforma la señal de salida del sistema (que es real) en compleja, ya que el bloque *Early-Late Gate Timing Recovery*, que realiza el muestreo, solicita una señal de este tipo. Posteriormente, hay que volverla real de nuevo para efectuar la decisión sobre los símbolos. Se alinean la salida del *buffer* (que ralentiza el ritmo al que llegan los símbolos generados) y del *decisor* y se procede al cálculo de la tasa de error.

Para realizar las funciones de **sincronización y muestreo** se ha elegido un bloque predefinido de Simulink llamado *Early-Late Gate Timing Recovery*. Por defecto, tiene un puerto de entrada por el que en este caso entra la señal temporal de salida del sistema POF. Se pide al usuario el número de muestras que contiene cada símbolo. Además, cuenta con dos salidas. La salida *Sym* es el resultado de aplicar la corrección de fase estimada a la señal de entrada. Esta salida es el valor de la señal para cada símbolo, que es utilizado para la toma de decisiones. La segunda salida, *Ph*, da la estimación de fase para cada símbolo en la señal de entrada. Cabe destacar que si el valor de esta segunda salida está muy cerca de cero o del número de muestras por símbolo, la precisión del bloque queda comprometida.

Posteriormente, la señal de salida entra en el bloque **decisor**. Éste se encarga de asociar a cada valor de la señal de entrada uno de salida, decidiendo así a cuál de los  $M$  niveles de la modulación pertenece el símbolo que ha sido enviado. Para realizar esta tarea se pensó en usar el bloque Simulink llamado *Look-Up Table*, que asocia a unos valores de entrada proporcionados los valores indicados para la salida. Este bloque necesita los valores de los umbrales de decisión de antemano, dato del que no se dispone en sistemas que trabajan en tiempo real, por lo que no sirve para el trabajo que nos ocupa. Por este motivo, en este proyecto se ha implementado un bloque personalizado, usando el mismo principio que el del bloque *Look-Up Table* pero modificándolo de tal forma que la entrada sea variable en tiempo consiguiendo adaptación de la salida a la señal de entrada. Para ello, se programa una función que calcula los umbrales de decisión de forma robusta. Partiendo de la idea de buscar los datos correspondientes a las modas de una distribución estadística, se usa la función *kmeans* que distribuye los datos de la matriz de entrada en un número determinado de grupos o *clusters* en función de las distancias euclídeas de los puntos a cada uno de los grupos. *Kmeans* proporciona un vector con los índices de clúster de cada punto. Los datos de cada trama de entrada quedan distribuidos en grupos, que se corresponden con los niveles de la modulación PAM. Así se encuentran los umbrales de decisión a partir de los cuales se calculan los valores de entrada y salida de la tabla de consulta con los que poder decidir correctamente la secuencia de símbolos transmitida.

Una vez calculados los símbolos de salida, se coloca un bloque de la librería de Simulink para **alinear** las señales, llamado *Align Signals*. Recibirá como entradas la secuencia de símbolos generada en el extremo transmisor, y la de salida correspondiente a los símbolos decididos. La alineación se realiza mediante una correlación de ambas señales. Para ello, se le pide al usuario introducir el valor de la ventana de correlación, que será definido en el archivo de los parámetros. Su valor se fija a un cuarto de la longitud de trama, ya que se ha comprobado mediante las simulaciones que es un valor suficiente para conseguir el correcto funcionamiento del sistema. Este bloque elimina las primeras muestras correspondientes a la ventana para medir los errores que ocurren a partir del momento en que ambas entradas quedan alineadas.

Para poder hacer bien el alineado de las señales es necesario ralentizar la tasa de símbolos de entrada. Esto es debido al solape que es necesario introducir para que en cada instante de simulación no sólo dispongamos de la información de la trama actual sino también de parte de la trama anterior. Así, en el proceso de recuperación de la señal en el receptor, los símbolos de salida en cada instante de simulación son la mitad que los de entrada, debido a que se elimina la mitad de la trama por ser redundante. Para esto se hace necesario añadir un **buffer** que saque el número de símbolos correspondiente a la mitad de la longitud de una trama.

Como bloque final se ha colocado un **medidor de errores** cuya función es comparar las señales que recibe en sus puertos de entrada: secuencia de datos transmitida y secuencia de datos recibida tras ser alineadas. Devuelve el número de errores que se han producido, el número de símbolos que se han transmitido y calcula la probabilidad de error como cociente entre las medidas anteriores.

### 3.5. Librería POF

En esta sección se muestra cómo se ha creado la librería a partir de los bloques mencionados y su inclusión en el buscador de librerías de Simulink.

La Figura 3.27 muestra es el aspecto que presenta la librería creada para este proyecto fin de carrera. A partir de aquí, el usuario puede montar su propio sistema POF. Esta librería está bloqueada, de tal manera que no se pueden modificar los códigos. Sólo se permite introducir los parámetros en el cuadro de diálogo.

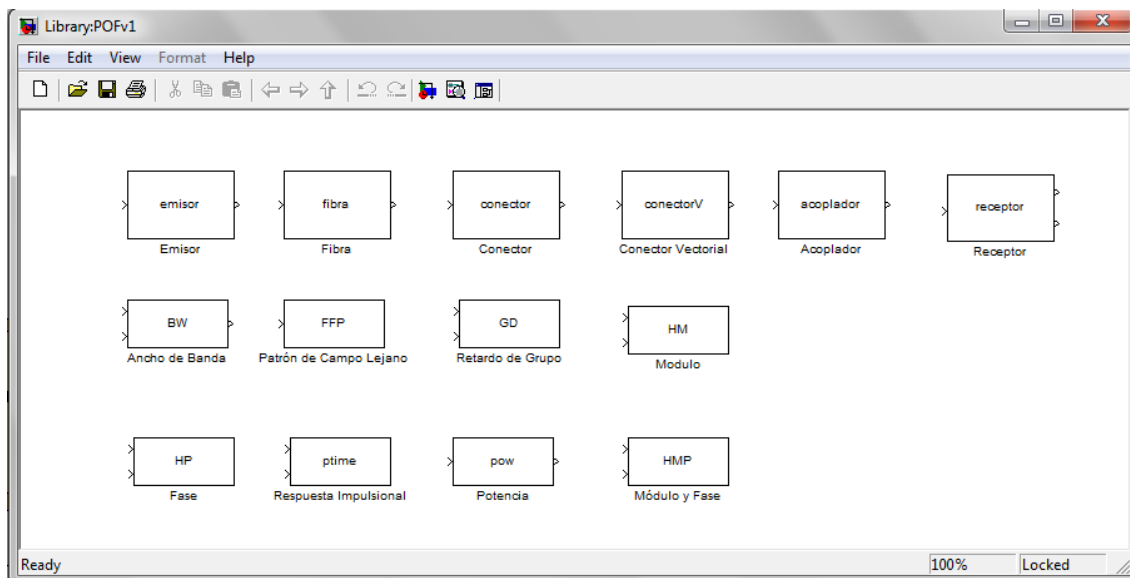


Figura 3.27: Librería POF

Una vez creada, se ha añadido al buscador de librerías de Simulink con el nombre "Bloques POF" para que los bloques estén accesibles permitiendo trabajar en cualquier ubicación. Para ello se ha copiado una carpeta llamada "Librería" en el *path* o ruta a la que Matlab tiene acceso. Ésta incluye los códigos de los bloques, la librería creada y todos los ficheros necesarios para el funcionamiento de éstos. Además, hay que editar correctamente el archivo `slblocks.m`, en el que aparece el nombre de la librería a añadir junto con otros atributos para que la nueva librería aparezca incluida en el buscador de Simulink. Realizado esto, el resultado es:

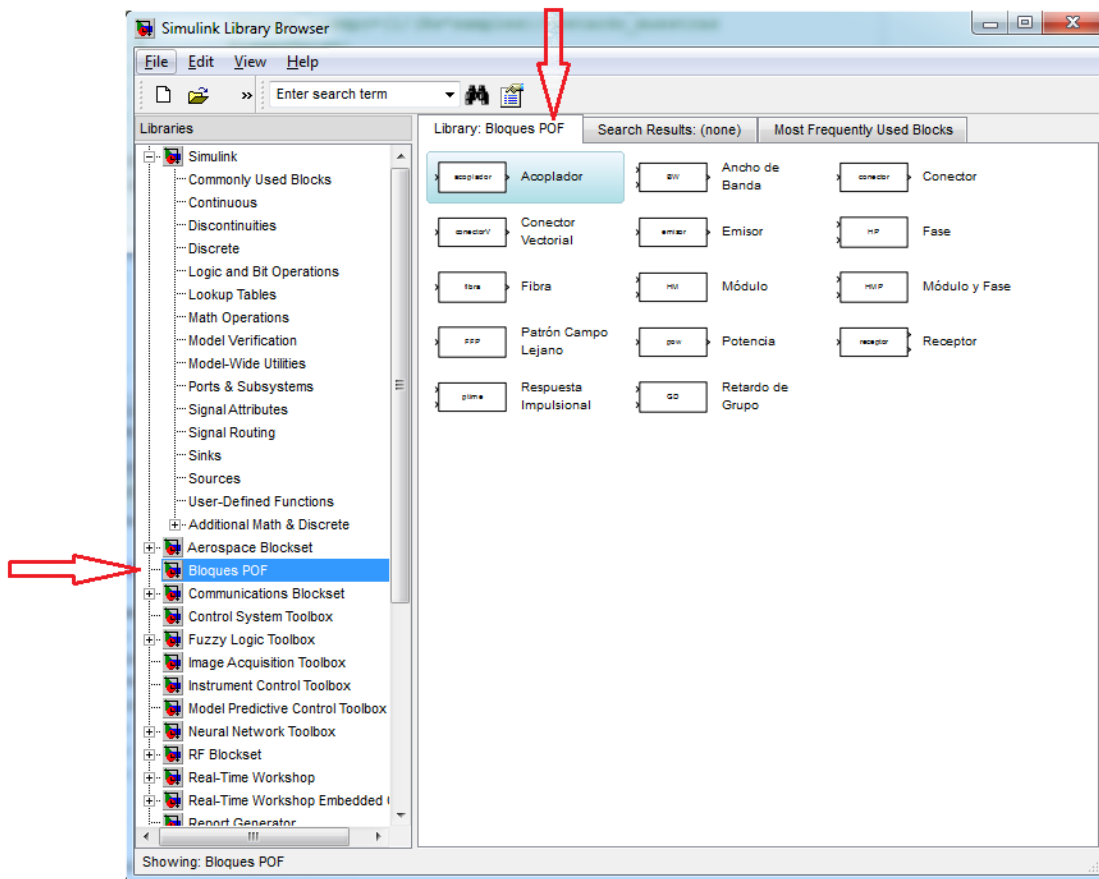


Figura 3.28: Imagen del buscador de librerías de Simulink, señalando la inclusión de "Bloques POF"

Una vez presentada la librería con el conjunto de bloques que se ha creado y con los que se cuenta para diseñar el sistema completo con posibilidad de comprobación, se procederá a realizar y a analizar distintas configuraciones en el siguiente capítulo.

# Capítulo 4: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En este capítulo se analizan varios ejemplos en los que se aplican algunos de los bloques de la librería POF creada. Se representan resultados y se realizan comentarios sobre los efectos que produce la modificación de los parámetros más importantes y sus limitaciones.

## 4.1 Sistema de prueba

Para comprobar el funcionamiento general de los bloques creados pertenecientes al sistema de transmisión, se ha diseñado un sistema POF de prueba. Sobre éste sistema se irán realizando diversas modificaciones para ratificar su adecuado comportamiento, lo que nos permitirá extraer una serie de conclusiones y observaciones. A continuación se describe brevemente el esquemático Simulink de este sistema así como los parámetros que se van a usar para analizar su comportamiento.

### 4.1.1. Descripción

En la Figura 4.1 se muestra esquemáticamente el sistema POF que vamos a evaluar con la librería Simulink creada en este trabajo. Éste es un sistema muy sencillo que consta de un emisor, dos tramos de fibra unidos mediante un conector y un receptor. Así, se pretende evaluar el efecto de los distintos parámetros de los bloques sobre la señales que se transmiten y las prestaciones del sistema de la misma forma que lo podría hacer un usuario de nuestra librería.

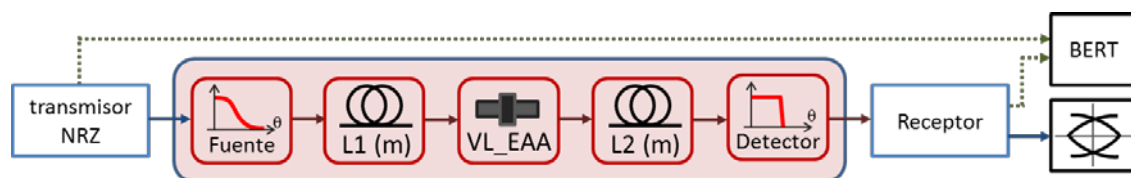


Figura 4.1: Sistema POF de prueba

Como ya se indicó en capítulos anteriores, se necesita completar el esquema conectando una parte transmisora y receptora eléctricas antes y después del enlace POF.

En la figura 4.2 se representa el esquemático Simulink del sistema completo. En color naranja está resaltado el subsistema correspondiente al transmisor y en color azul el subsistema receptor. Se ha resaltado en rojo el sistema POF propiamente, formado por un emisor, dos tramos de fibra óptica unidos por un conector y un receptor.

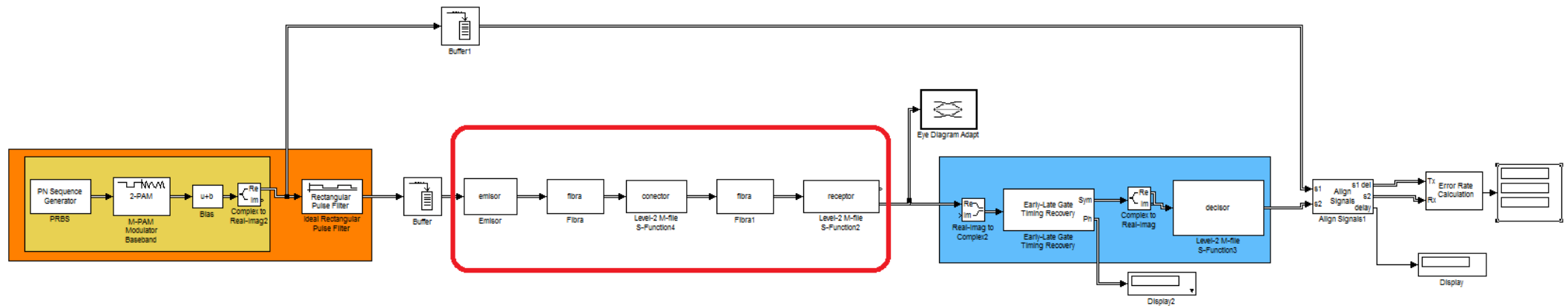


Figura 4.2: Esquema del sistema de pruebas completo.

#### 4.1.2. Parámetros considerados

En cuanto a los parámetros internos de la simulación, el tamaño de la trama se ha fijado en 2048 muestras mientras que el número de muestras por símbolo considerado es 32. Con estos valores, el número de símbolos contenidos en una trama es de 64, mientras que el solape entre tramas considerado implica a 32 símbolos. Este valor condiciona la máxima tasa de transmisión y longitud de fibra para los que la simulación se realiza correctamente sin la aparición de fenómenos de borde entre tramas. Así y según se ha explicado en el Capítulo 2, con esta configuración es posible simular enlaces POF de hasta 64 metros con una tasa de transmisión de 100 Mb/s, mientras que este valor se reduce a 12.8 metros para una tasa de 500 Mb/s. Si se desea simular enlaces de mayor longitud o con tasa de transmisión más elevada, será necesario aumentar el tamaño de la trama o disminuir el de muestras por símbolo.

Por otra parte, respecto a los parámetros de configuración del sistema, partiremos de una situación inicial en la que la tasa de transmisión es de 100 Mb/s. Este valor es bajo para la transmisión mediante fibra óptica de vidrio pero no tanto para la de plástico, debido a la mayor limitación en ancho de banda que ésta presenta. Además, por simplicidad, inicialmente se opta por una modulación por amplitud de pulsos con dos niveles.

Después de simular esta situación, se proponen variaciones de los principales parámetros para estudiar su comportamiento y los efectos surgidos. La Tabla 4.1 refleja los valores por defecto de estos parámetros, de forma que cuando se produzca cambios en alguno de ellos, se especificará.

Distribución espacial: gaussiana	FWHM=30°
Tipo de fibra	GH
Longitud de fibras	10m
Tipo de conector	VL_GH sin desalineamiento
Ángulo de recepción	30°

Tabla 4.1: Parámetros considerados en los ejemplos de aplicación, junto con sus valores por defecto.

En los resultados gráficos mostrados, se ha saturado la imagen de la potencia emitida para poder ver correctamente todas las imágenes correspondientes a las matrices de potencia óptica en puntos intermedios.

## 4.2. Distribución espacial del emisor

El primer parámetro a estudiar es la anchura de la distribución espacial del emisor. Ésta se modifica a través del parámetro  $FWHM$ , como se apuntaba en el Capítulo 3. En función de él varía la anchura en grados en la que emite la fuente de luz. A continuación se presenta el sistema de prueba con dos distribuciones espaciales de diferente anchura y se muestran las señales en tiempo para evaluar los resultados.

### 4.2.1. Fuente óptica tipo LED

Para simular el efecto de un enlace POF con una fuente tipo LED, se considera una distribución espacial ancha, siendo el parámetro  $FWHM = 30^\circ$ .



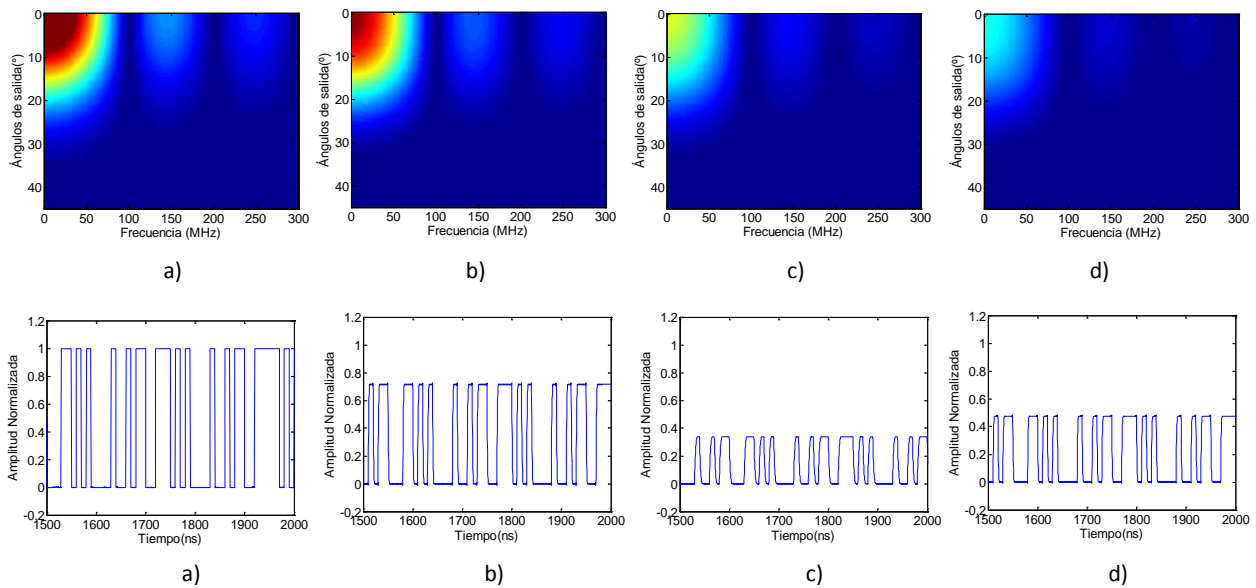


Figura 4.3: Imágenes del módulo de la matriz de potencia óptica (arriba) y señal temporal (abajo), a lo largo de la cadena de transmisión. a) Salida del emisor, b) salida del primer tramo de fibra, c) salida del conector y d) salida del segundo tramo de fibra para un emisor con FWHM=30°.

En la Figura 4.3 se presentan las matrices de propagación de potencia óptica en los puntos intermedios de la cadena de transmisión: salida del emisor, salida del primer tramo de fibra, salida del conector y salida del segundo tramo de fibra. Estas imágenes, igual que las mostradas en el Capítulo 3, tienen como eje de abscisas la frecuencia expresada en MHz y en el eje de ordenadas la distribución espacial expresada mediante los ángulos de salida en grados. En ellas se pueden apreciar los lóbulos correspondientes a la transformada de Fourier de la señal de pulsos temporal que llega al emisor.

Las imágenes correspondientes a las matrices de potencia muestran la atenuación de la potencia al ir propagándose de un componente a otro. Cabe destacar que esta atenuación no es constante con el ángulo con el que la luz sale del componente (eje vertical) ni con la frecuencia (eje horizontal), si bien estos efectos no son apreciables en las imágenes mostradas. En las gráficas de la señal temporal se observa también el efecto de la pérdida de potencia, al mismo tiempo que queda patente el retardo que introducen los tramos de fibra óptica. Otro efecto apreciable es el de la dispersión, que filtra las componentes de la señal en frecuencias más altas lo cual se visualiza en las gráficas como un suavizado de los flancos de la señal.

En la Figura 4.4 se compara la señal temporal que entra en el sistema, con la salida al final de la cadena de transmisión. Como se puede observar, se trata de la misma señal, por lo que el sistema compuesto por nuestros bloques realiza la transmisión correctamente. Aquí se aprecian mejor los efectos comentados con anterioridad.

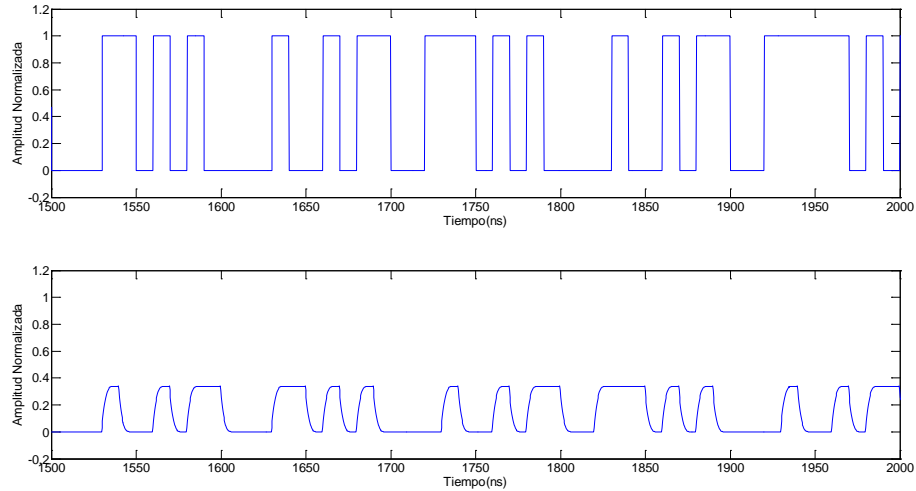


Figura 4.4: Señales de entrada y salida en el dominio temporal para un emisor con anchura espacial  $30^\circ$

#### 4.2.2. Fuente óptica tipo láser

A continuación se repite el estudio anterior para una anchura espacial de la fuente de  $15^\circ$  que podría estar asociado a una fuente óptica tipo láser. Los resultados en los distintos puntos de la cadena de transmisión se muestran en la Figura 4.5.

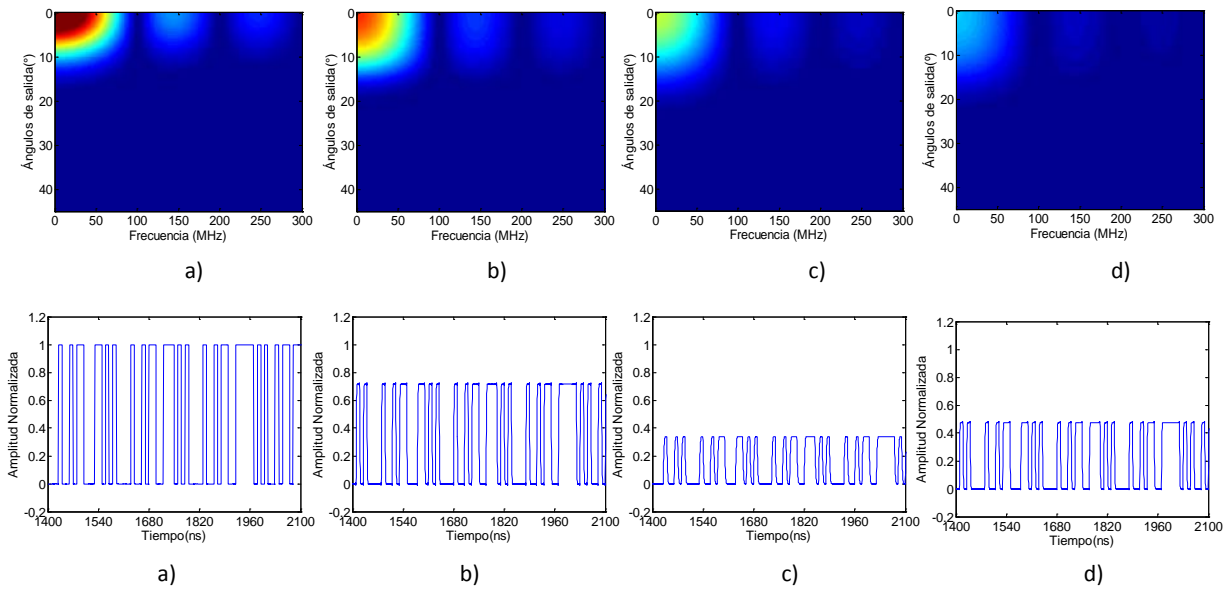


Figura 4.5: Imágenes del módulo de la matriz de potencia óptica (arriba) y señal temporal (abajo), a lo largo de la cadena de transmisión. a) Salida del emisor, b) salida del primer tramo de fibra, c) salida del conector y d) salida del segundo tramo de fibra para un emisor con  $\text{FWHM}=15^\circ$ .

Al haber reducido la anchura espectral de la fuente de luz, se observa que la matriz de potencia óptica a la salida del emisor abarca de 0 a  $15^\circ$  en cuanto a los ángulos de salida. Los efectos que se producen durante la propagación de dicha matriz son similares a los obtenidos en el caso anterior. Eso sí, la distribución de potencia óptica a la salida del sistema es más estrecha que en el caso anterior, lo cual introducirá mejoras sobre las prestaciones.

Análogamente al caso anterior, la representación de la señal temporal de salida mantiene la forma de la de entrada (Figura 4.6), mostrando el descenso de la amplitud que introducen las pérdidas en los componentes y el retardo y la dispersión que introduce la fibra. No se aprecian cambios significativos con respecto al caso anterior. Sin embargo, es esperable que el sistema tenga mejores prestaciones si la distribución espacial de la luz emitida por la fuente es más estrecha, ya que la luz inyectada en la POF lo hace con ángulos menores y por tanto contribuyen menos a la dispersión introducida por la fibra.

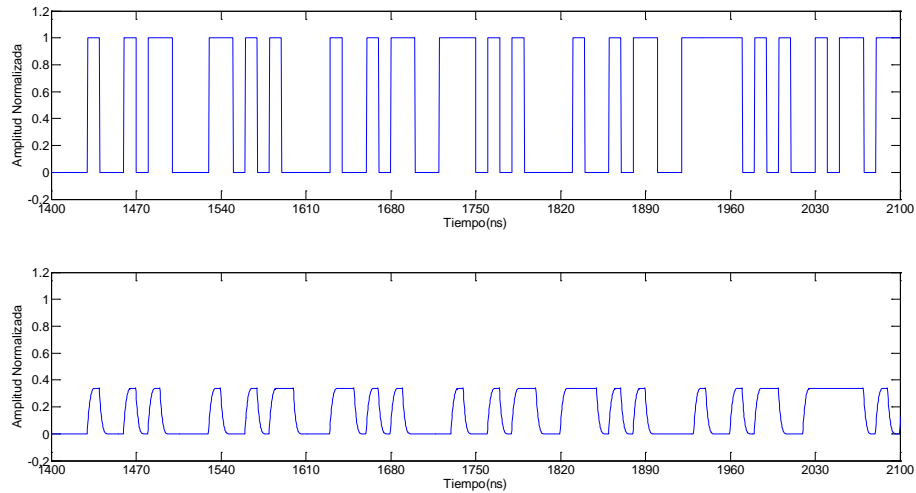


Figura 4.6: Señales de entrada y salida en el dominio temporal para un emisor con anchura espacial  $15^\circ$

Para comparar los resultados obtenidos para las dos distribuciones espaciales del emisor consideradas, a continuación se muestran los diagramas de ojo y las respuestas frecuenciales equivalentes asociadas a ambos sistemas. Estos resultados se muestran en la Figura 4.7.

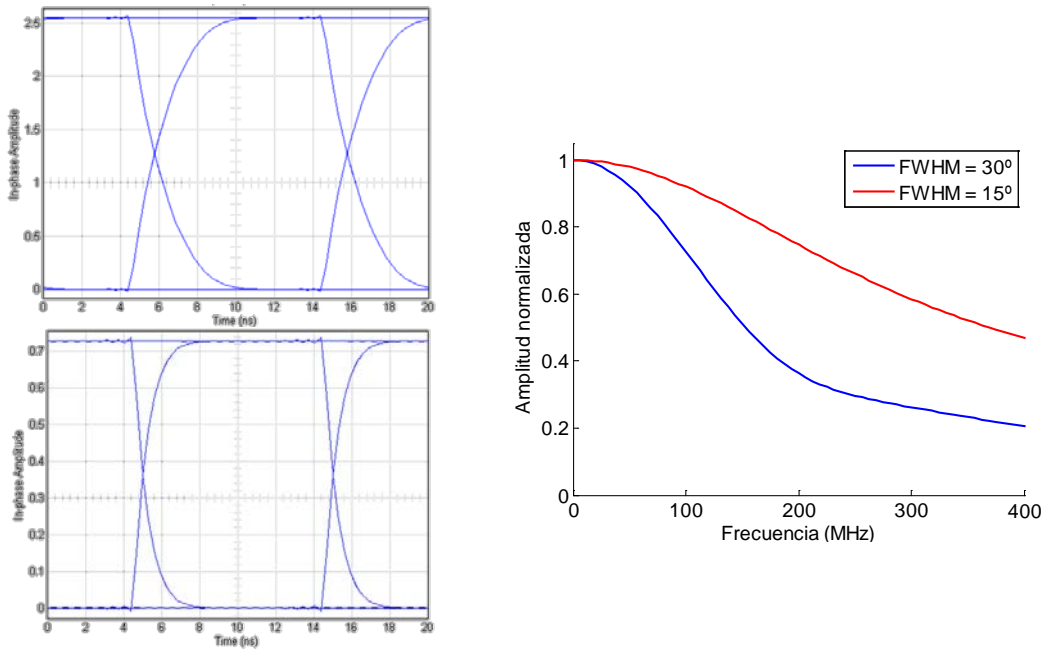


Figura 4.7: Diagramas de ojo para las dos anchuras espaciales consideradas:  $30^\circ$  (arriba),  $15^\circ$  (abajo) y módulo normalizado de la función de transferencia para ambos casos.

Como se puede apreciar en la representación de las respuestas frecuenciales equivalentes, la disminución de la anchura espacial del emisor hace que el enlace POF completo presente mejor ancho de banda, lo cual se refleja en un diagrama de ojo menos suavizado. De cualquier manera, los diagramas de ojo presentan una gran apertura demostrando la viabilidad de ambos sistemas.

### 4.3. Longitud de la fibra

Como se ha podido observar en los resultados anteriores, la fibra produce varios efectos sobre la matriz de distribución angular de potencia óptica que se ven reflejados en las señales temporales. Por una parte, la fibra reduce la potencia de la señal y por otra, introduce un efecto de filtro paso bajo debido al fenómeno de la dispersión. La longitud es uno de los parámetros más importantes a la hora de calcular la salida del sistema POF. A continuación se evalúa su influencia sobre los resultados de la simulación.

Para estudiar el efecto que produce la longitud de la fibra en el sistema, se compara el enlace por defecto con otro en el que únicamente se varía la longitud de los tramos de fibra de forma que se cubre una distancia total de 60 metros frente a los 20 metros del sistema de referencia. Los resultados obtenidos en los distintos puntos de la cadena de transmisión se muestran en la Figura 4.8.

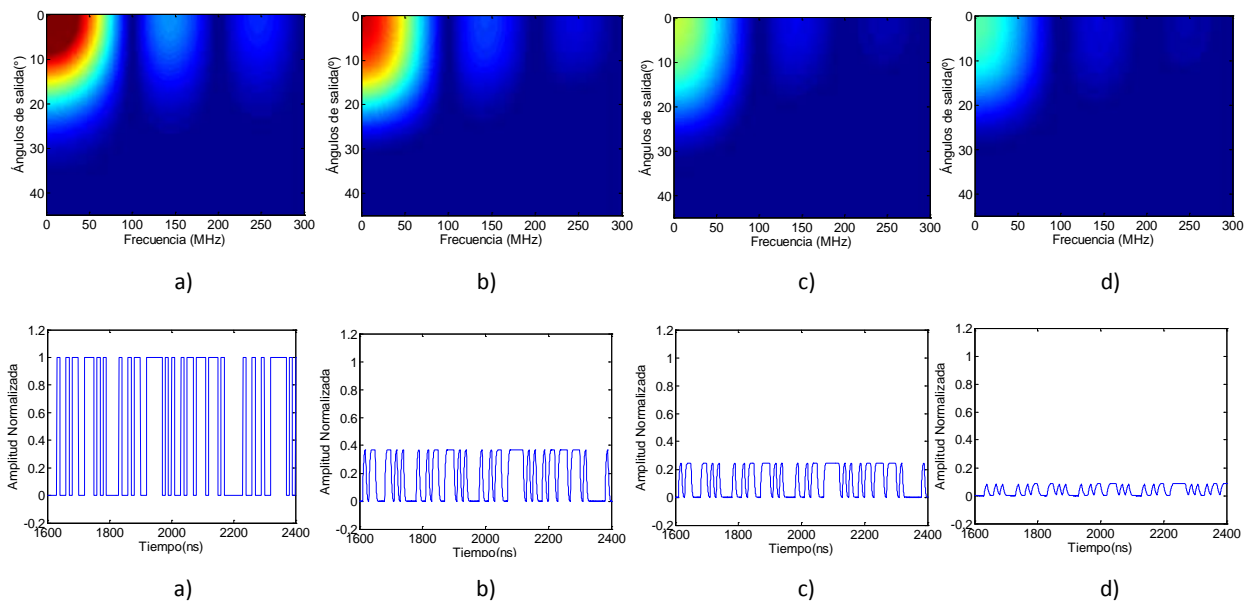


Figura 4.8:Arriba matrices de potencia óptica, abajo señales temporales en los puntos intermedios de la cadena para L=60m, a)Salida emisor, b)Salida de tramo de fibra 30m, c)Salida del conector y d)Salida de tramo fibra de 30m

A la vista de la figura, se concluye que aumentando la longitud de los tramos de fibra óptica, la atenuación, el retardo y la dispersión aumentan. Esto se observa especialmente en las figuras correspondientes al dominio temporal donde a medida que la señal avanza por la cadena de transmisión, su valor disminuye, queda más redondeada y representando el mismo intervalo de tiempo, los pulsos reflejados aparecen más retardados.

La Figura 4.9 muestra más en detalle las señales temporales.

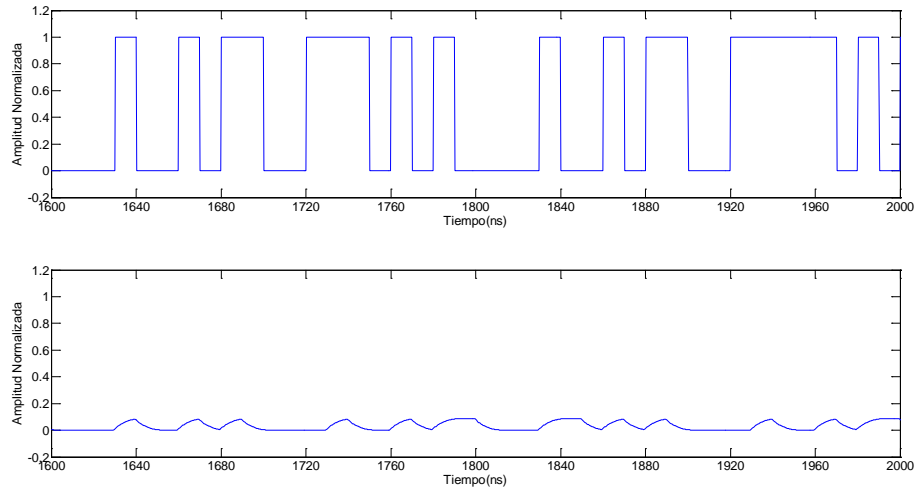


Figura 4.9: Señal de entrada frente a salida para longitud total 60 metros.

Para comparar los dos sistemas considerados en el análisis de la longitud de la fibra, la Figura 4.10 muestra los diagramas de ojo y las respuestas frecuenciales equivalentes asociadas a ambos.

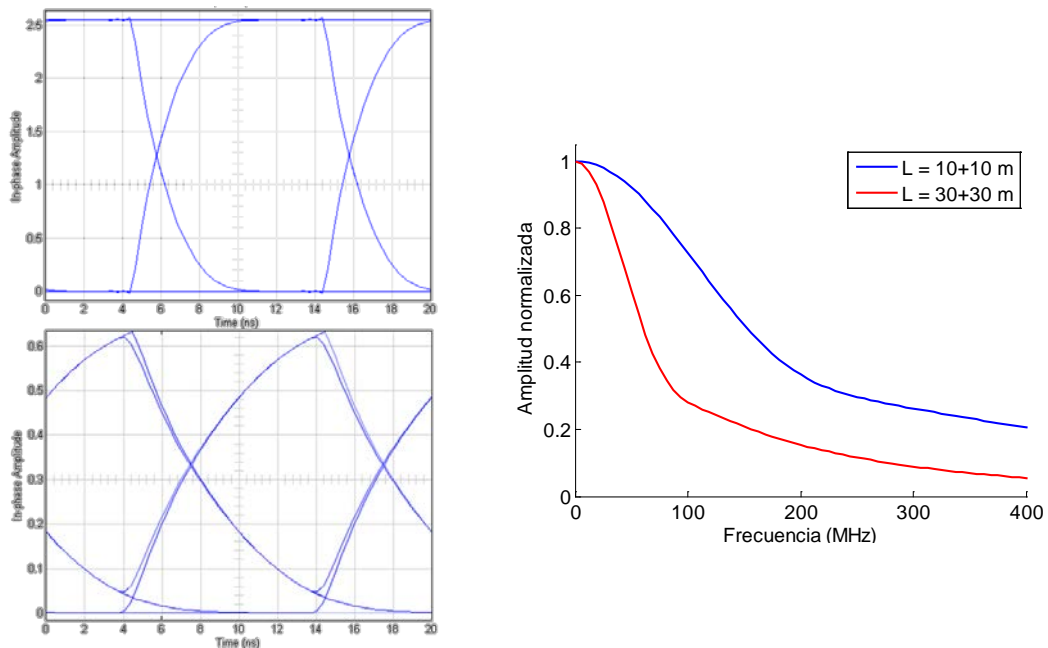


Figura 4.10: Diagramas de ojo para las dos longitudes de enlace consideradas: 10+10 metros (arriba), 30+30 metros (abajo) y módulo normalizado de la función de transferencia para ambos casos.

Como ya se observaba en la representación de la señales en el dominio del tiempo, al aumentar la longitud de la fibra el ojo se redondea y su apertura disminuye. Este efecto también se refleja en una reducción notable del ancho de banda ofrecido por el sistema.

#### 4.4. Conectores con desalineamientos

Después de evaluar el efecto de la longitud de la fibra, se pretende analizar el efecto que producen los desalineamientos del conector sobre las señales en tiempo y sobre las matrices de potencia óptica que se propagan por el sistema. En el Capítulo 3, quedó de manifiesto que el

desalineamiento axial es más perjudicial que el longitudinal, como se puede observar en la figura que representa las matrices de potencia óptica a la salida del conector para distintos casos.

#### 4.4.1. Desalineamiento axial

A continuación se representa el sistema inicial aplicando un desalineamiento axial de 300  $\mu\text{m}$  usando el modelo de conector vectorial VL\_GH.

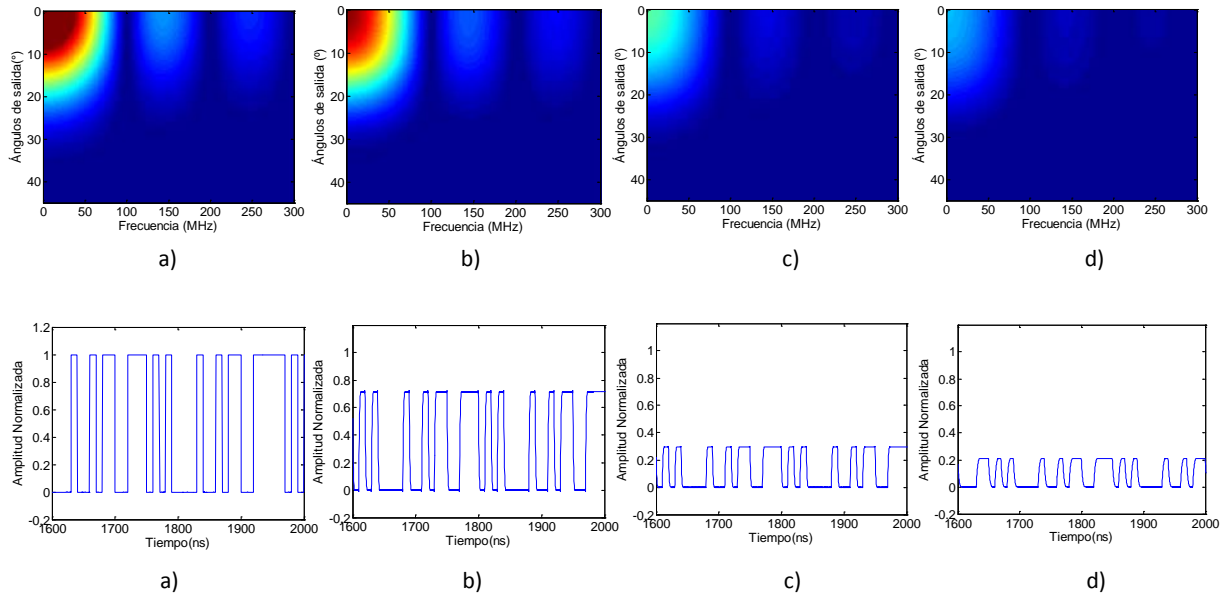


Figura 4.11: Señales temporales en los puntos intermedios de la cadena para conector con desalineamiento axial de 300  $\mu\text{m}$ , a) salida del emisor, b) y d) salida de los tramos de fibra y c) salida del conector.

El desalineamiento axial produce una considerable atenuación de la potencia, efecto que se ve en las imágenes de las matrices de potencia óptica, a pesar de haber saturado la imagen de potencia del emisor para poder observar las matrices de salida del resto de componentes. Este desalineamiento produce una reducción importante de la amplitud de la señal temporal. Se puede ver que de la gráfica correspondiente a la salida de la fibra a la correspondiente a la salida del conector ((b) y (c), respectivamente) la amplitud decae mucho. Este efecto queda claro en la siguiente figura, donde se representa la señal temporal de entrada al sistema POF respecto a la de salida del sistema completo.

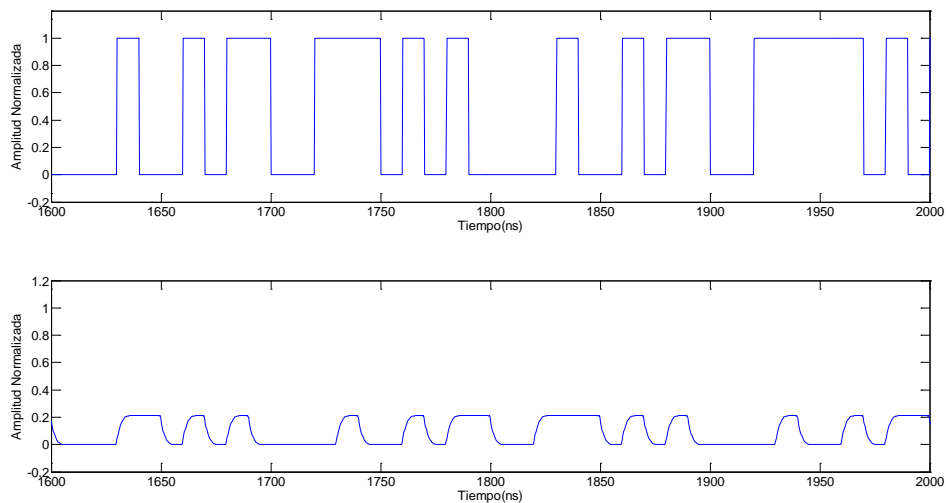


Figura 4.12: Señal de entrada frente a salida para 300 $\mu\text{m}$  de desalineamiento axial

#### 4.4.2. Desalineamiento longitudinal

Ahora se estudia el efecto del desalineamiento longitudinal. Para ello se introduce un valor de 500  $\mu\text{m}$  y se usa el modelo vectorial de conector para el tipo VL\_GH.

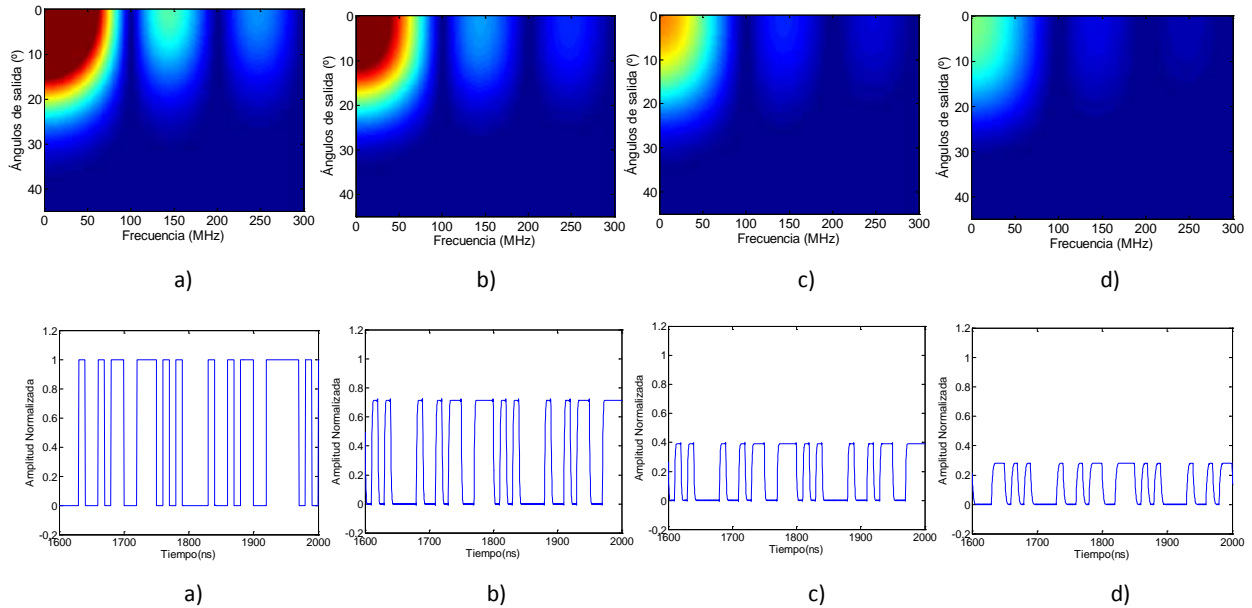


Figura 4.13: Señales temporales en los puntos intermedios de la cadena para conector con desalineamiento longitudinal de 500  $\mu\text{m}$ , a) salida del emisor, b) y c) salida de los tramos de fibra y c) salida del conector.

Como ya se ha indicado en el estudio del desalineamiento axial, los efectos del longitudinal son menores. En los resultados mostrados se observa que la pérdida de potencia que produce es algo menor a pesar de considerarse un desalineamiento mayor.

En ambos casos se han escogido valores de desalineamiento altos, cercanos a los valores máximos considerados en el modelo de conector para acentuar el efecto producido sobre el resultado.

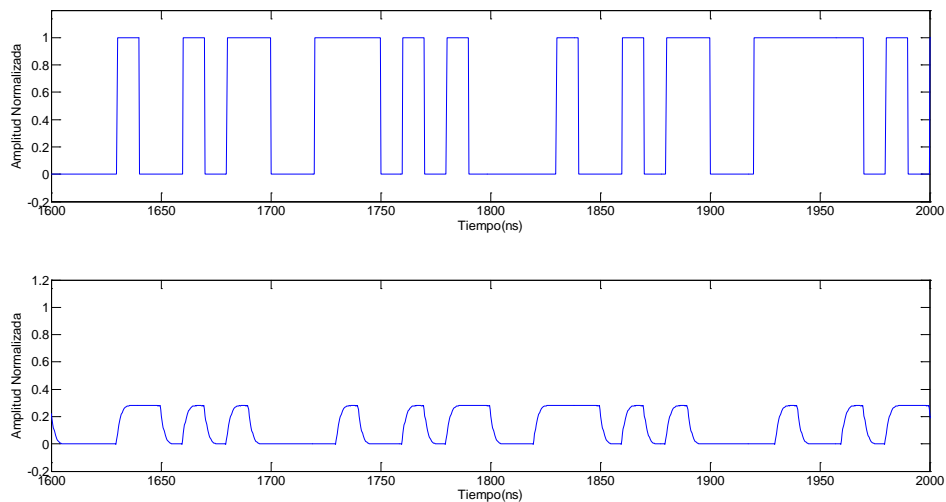


Figura 4.14: Señal de entrada frente a salida para 500 $\mu\text{m}$  de desalineamiento longitudinal

Para poder comparar mejor el efecto cada tipo de desalineamiento, la Figura 4.15 muestra los diagramas de ojo junto con las respuestas frecuenciales equivalentes para los dos casos considerados.

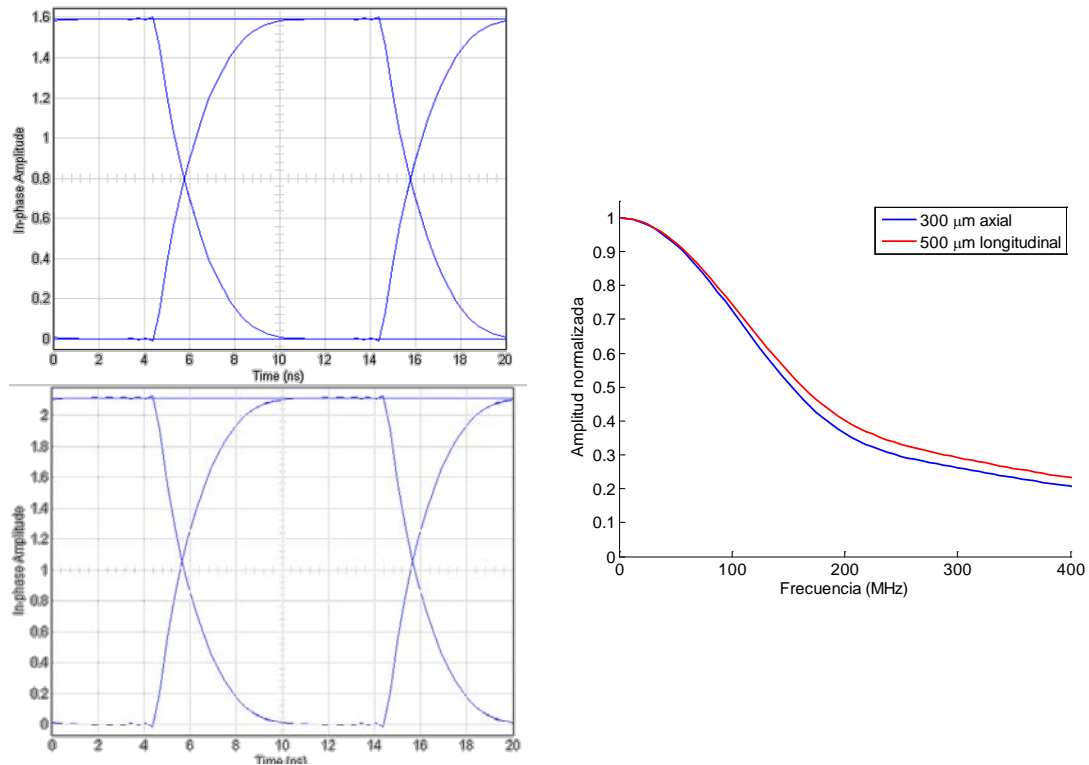


Figura 4.15: Diagramas de ojo para los dos desalineamientos considerados: 300  $\mu\text{m}$  (arriba), 500  $\mu\text{m}$  (abajo) y módulo normalizado de la función de transferencia para ambos casos.

Como se puede observar las diferencias son muy leves, si bien el ancho de banda en caso de presentarse desalineamiento longitudinal es ligeramente mayor. Esto es debido al efecto de filtrado espacial que introduce este tipo de desalineamiento, como ya se ha comprobado experimentalmente.

## 4.5. Área del receptor

En el bloque receptor, el parámetro que influye es el ángulo de recepción, ya que se ha configurado el receptor con la única finalidad de realizar un filtrado espacial en función de dicho valor. Así, podemos simular el efecto de receptores con distintos tamaños de área, siendo los más comunes en sistemas POF los de área grande. A continuación, se varía el valor del ángulo máximo del receptor para evaluar su efecto en la salida temporal, ya que por lo dicho anteriormente, se sabe que en cuanto a la matriz de potencia óptica, únicamente filtra los ángulos por encima del valor introducido.

### 4.5.1. Ángulo máximo de 5°

Para estudiar el efecto que produce la variación sobre el área del receptor, se simula el caso en el que el detector es capaz de aceptar luz hasta un ángulo máximo de 5°. Los resultados se muestran en las Figuras 4.16 y 4.17.



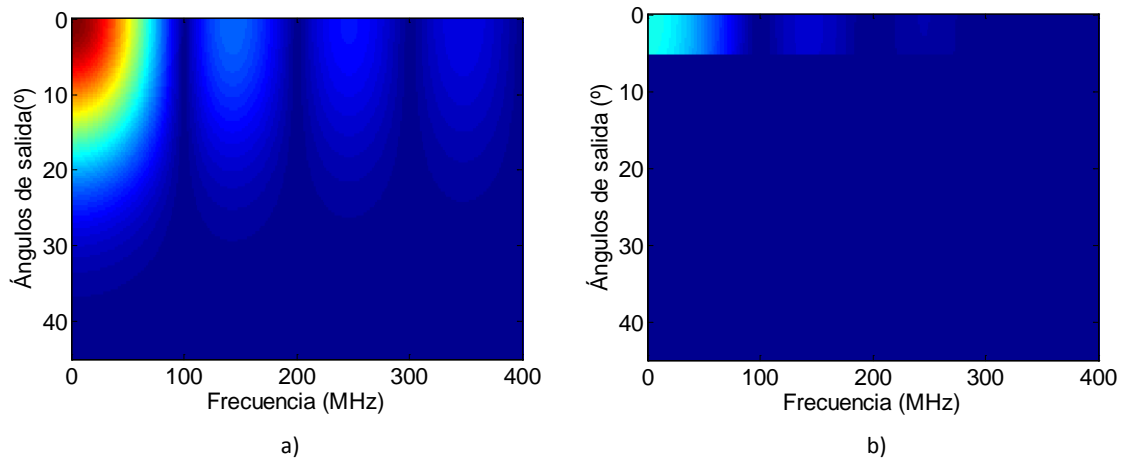


Figura 4.16: Matrices de potencia óptica correspondientes a: a) Emisor; b) Receptor con ángulo máximo de recepción de 5°

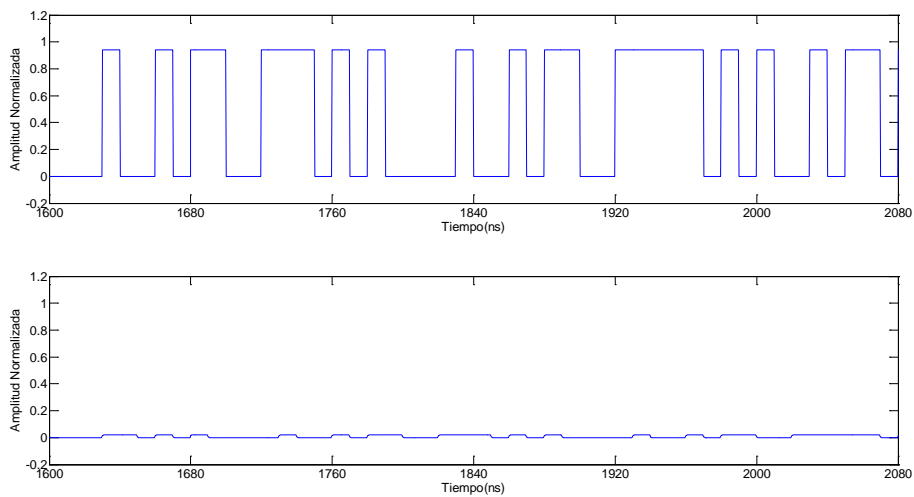


Figura 4.17: Señal de entrada frente a salida para ángulo máximo de recepción 5°.

En esta figura se nota el efecto de filtrado que aporta el receptor óptico. A su salida, la señal temporal es mucho más pequeña que la que se muestra en la misma figura que representa entrada al sistema respecto a salida del sistema para un ángulo máximo de recepción de 15°.

Como se esperaba, la amplitud del ojo es mucho menor que en cualquier otro caso, ya que la amplitud de la señal temporal que llega es muy pequeña debido al efecto de filtrado que introduce el receptor. Por este motivo, el ojo que se muestra para el caso siguiente es mayor. El ángulo máximo de recepción es mayor, por lo que capta luz en más ángulos, y por lo tanto, tiene un nivel de señal más alto.

#### 4.5.2. Ángulo máximo de 15°

A continuación consideramos otro detector que presenta un ángulo máximo de captación de luz de 15°. Los resultados para este caso se muestran en las Figuras 4.18 y 4.19.

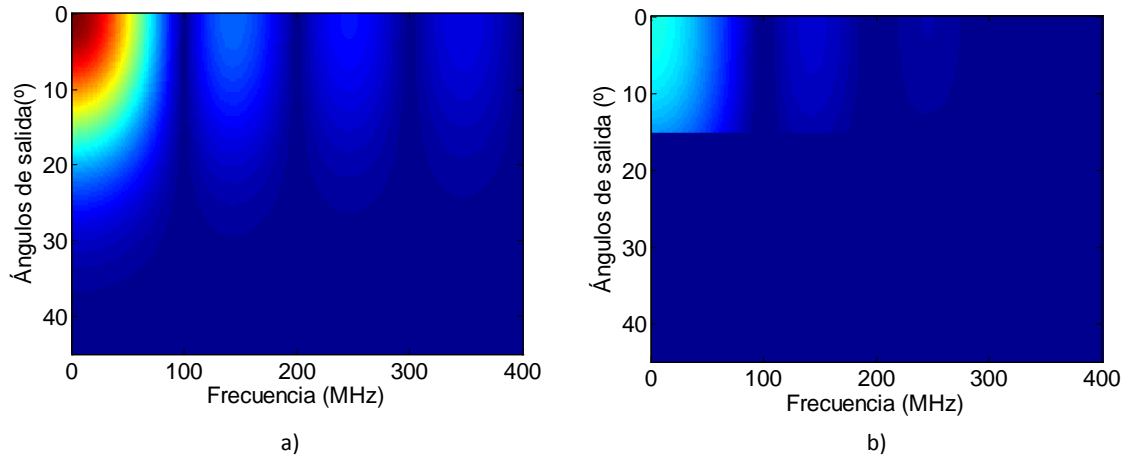


Figura 4.18: Matrices de potencia óptica correspondientes a: a) emisor; b) receptor con ángulo máximo de  $15^\circ$

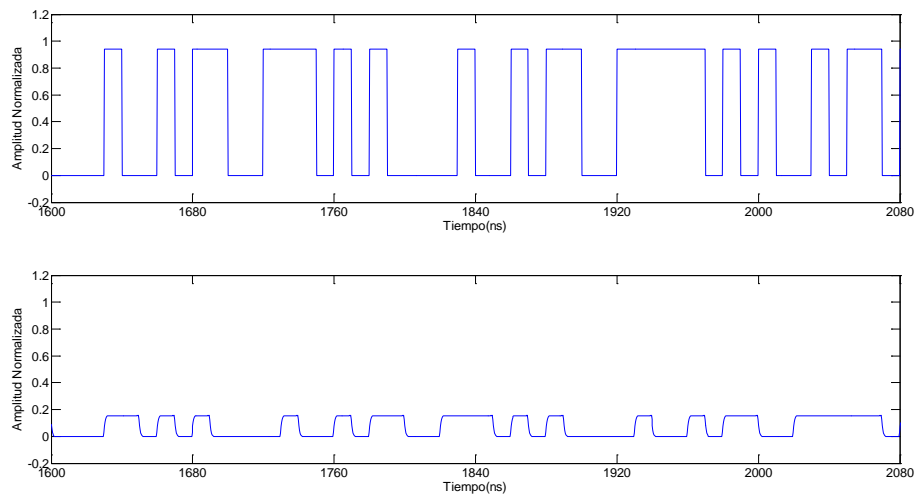


Figura 4.19: Señal de entrada frente a salida para ángulo máximo de recepción  $15^\circ$ .

Como se puede apreciar, el efecto del área del detector es doble. Por una parte, si el máximo ángulo de detección es pequeño, disminuye la amplitud de la señal recibida al perderse la luz que se radia con ángulos grandes. Por otra parte, y precisamente por ese efecto de filtrado espacial de la luz, los sistemas que incluyen detectores de áreas pequeñas presentan mejores características de ancho de banda. Estos dos efectos son fácilmente observables en la Figura 4.20, en la que se comparan el sistema de referencia y los dos sistemas considerados en esta sección.

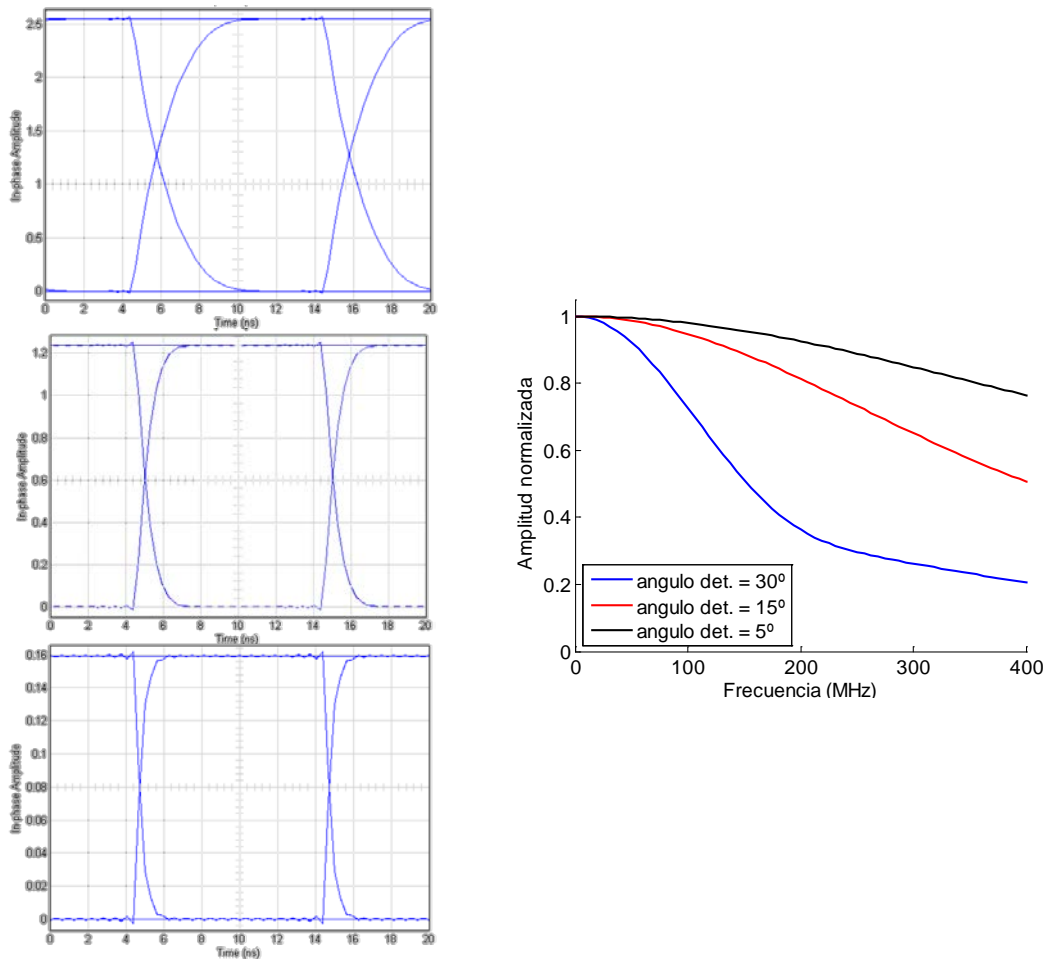
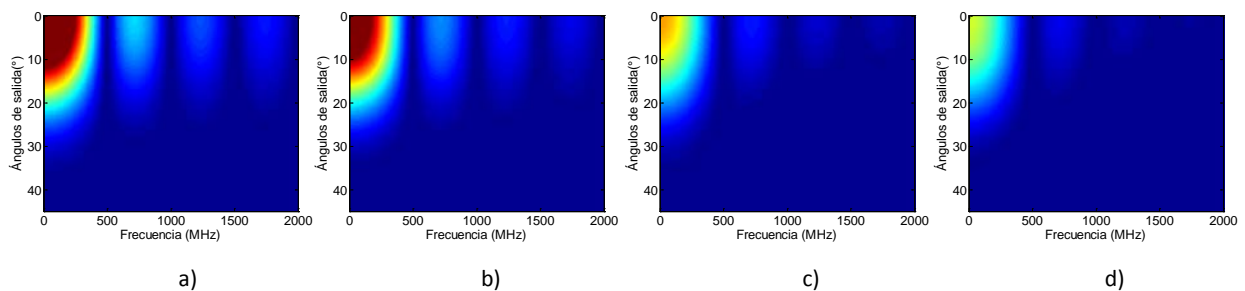


Figura 4.20: Diagramas de ojo para los tres ángulos máximos de recepción del detector considerados: 30° (arriba), 15° (centro), 5° (abajo) y módulo normalizado de la función de transferencia para los tres casos.

Se puede concluir que las características espaciales del detector introducen un compromiso entre pérdidas y ancho de banda, si bien la mayor parte de detectores comerciales de POF presentan un área grande.

#### 4.6. Tasa de transmisión

Un parámetro propio de la simulación que resulta interesante para evaluar es la tasa de transmisión,  $R_b$ . Hasta ahora se había utilizado el valor considerado por defecto de 100 Mb/s. Ahora, se procede a cambiar ese valor por 500 Mb/s. En este caso los tramos de fibra óptica usados son de 5 metros. Se ha elegido este valor para reducir el tiempo de simulación y no incurrir en errores por efectos de bordes en los límites de las tramas.



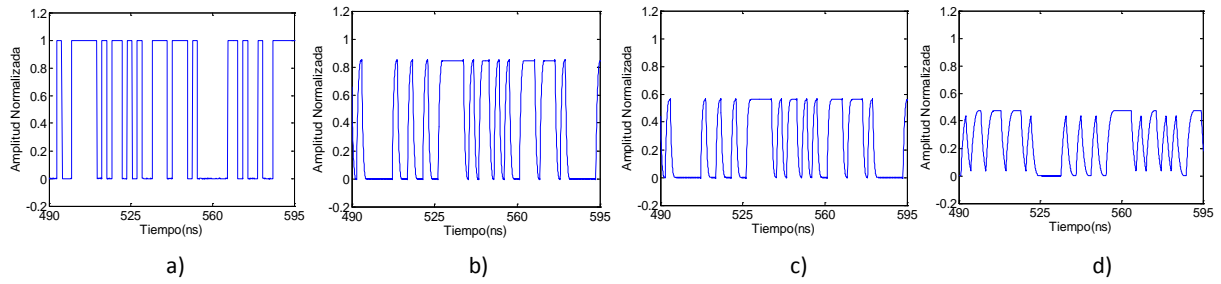


Figura 4.21: Ejemplo de aplicación de un sistema POF con tasa de transmisión 500 Mb/s y longitud total de 10 metros.

Las matrices de potencia óptica muestran, como en los casos anteriores, la pérdida de potencia que se produce al propagarse a lo largo del sistema. En este caso, es visible el efecto de filtrado en el dominio de la frecuencia que introducen los tramos de fibra. Así, las frecuencias más altas son atenuadas en mayor medida que las más bajas.

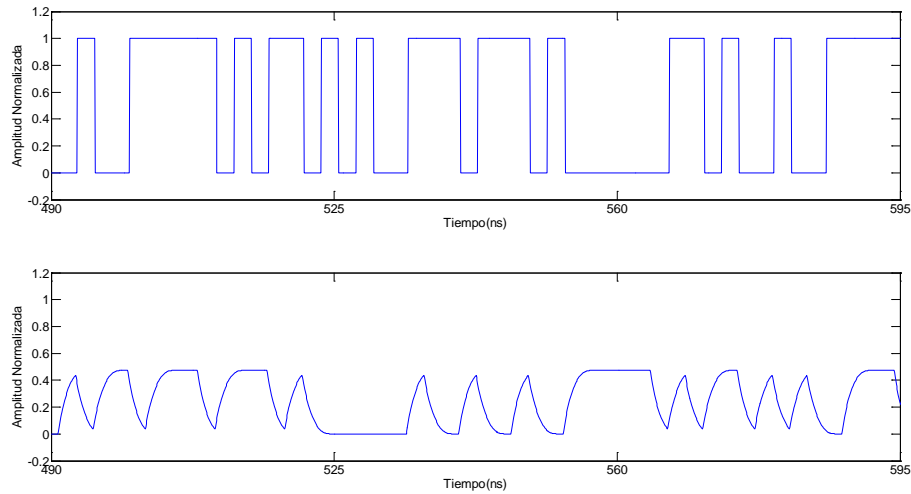


Figura 4.22: Señal de entrada frente a salida para una tasa de transmisión de 500Mb/s y longitud de 5 metros.

Para comparar este sistema con el de valores estándar para todos los parámetros, la Figura 4.22 muestra los diagramas de ojo y las respuestas frecuenciales equivalentes para ambos casos.

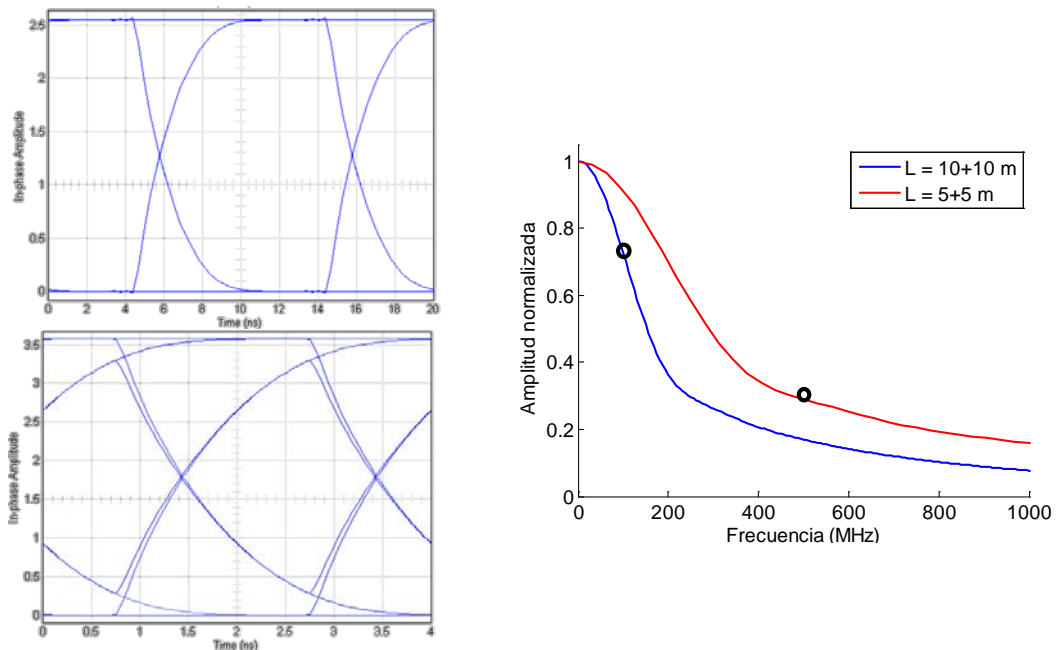


Figura 4.23: Diagramas de ojo para las dos tasas de transmisión consideradas: 100Mb/s con tramos de 10 metros (arriba), 500Mb/s con tramos de 5 metros (abajo) y módulo normalizado de la función de transferencia.

En la figura aparecen a la izquierda los diagramas de ojo correspondientes a 100Mb/s y 500Mb/s. A la derecha se representa en azul la función de transferencia para el sistema de referencia (20 m de fibra) y en rojo (10 m de fibra). En cada una de estas curvas se ha marcado la velocidad de transmisión a la que se trabaja. Se puede apreciar que el efecto de filtrado que se produce es mayor en caso de la tasa más alta.

#### 4.7. Señalización multinivel

Regresando a los valores por defecto, ahora se va a estudiar el efecto que produce aumentar el número de niveles de la modulación PAM. Para ello, se pone el valor del parámetro  $M$ , correspondiente al número de niveles, a 4 en vez de 2 como estaba hasta ahora.

A continuación se presentan los resultados de las señales en el tiempo en los puntos intermedios del sistema de transmisión para este valor y para tramos de longitudes distintas de fibra óptica.

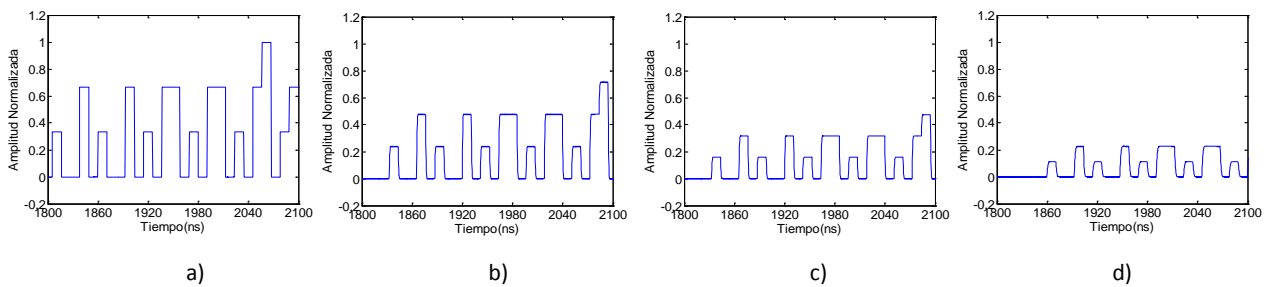


Figura 4.24: Señales temporales en los puntos intermedios de la cadena de transmisión óptica para modulación PAM de 4 niveles y tramos de fibra óptica de 10 metros.

En esta figura se nota claramente que ahora la señal temporal está formada por cuatro niveles. Conforme la señal se propaga por el sistema, los efectos que sufre son los mismos que en el caso de la señal PAM de 2 niveles. Las Figuras 4.25 y 4.26 representan las señales transmitida y recibida con más detalle y el diagrama de ojo en recepción, respectivamente.

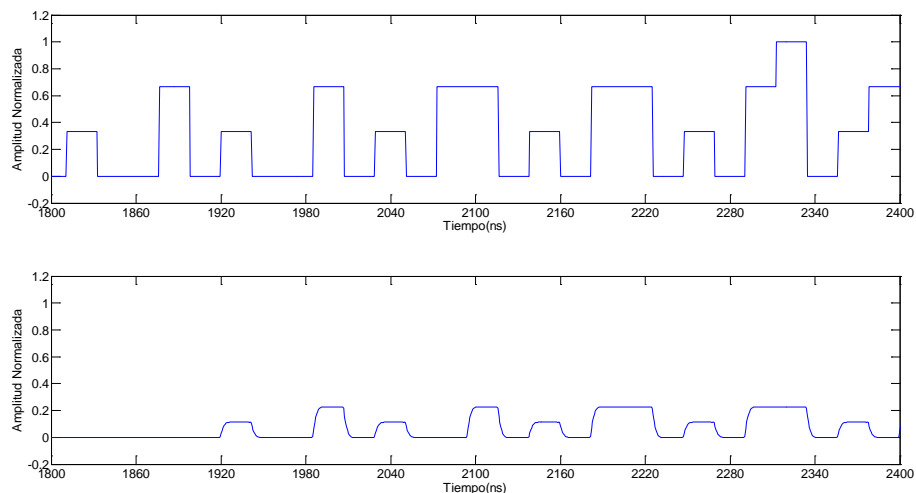


Figura 4.25: Señal de entrada frente a salida para una señal PAM de 4 niveles y tramos de 10 m de fibra óptica.

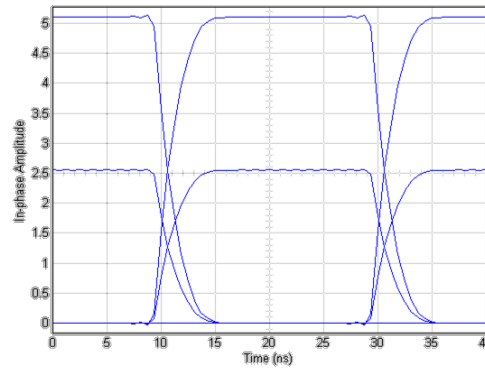


Figura 4.26: Diagrama de ojo para una señal PAM con 4 niveles y tramos de fibra óptica de 10 m.

Se ha demostrado que el bloque que más modificaciones introduce en la salida del sistema es el de la fibra óptica. Por ello, a continuación se evalúa el mismo sistema con una señal PAM de 4 niveles al que se le aumenta la longitud de cada tramo de fibra a 30 metros.

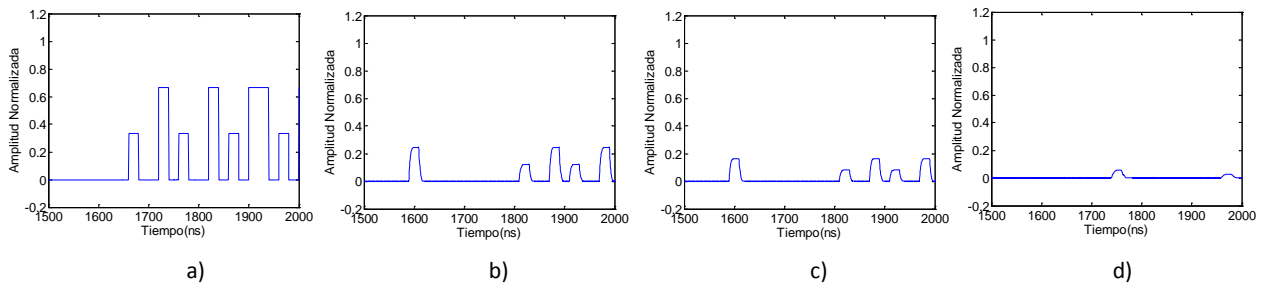


Figura 4.27: Señales temporales en los puntos intermedios de la cadena de transmisión óptica para modulación PAM de 4 niveles y tramos de fibra óptica de 30 metros.

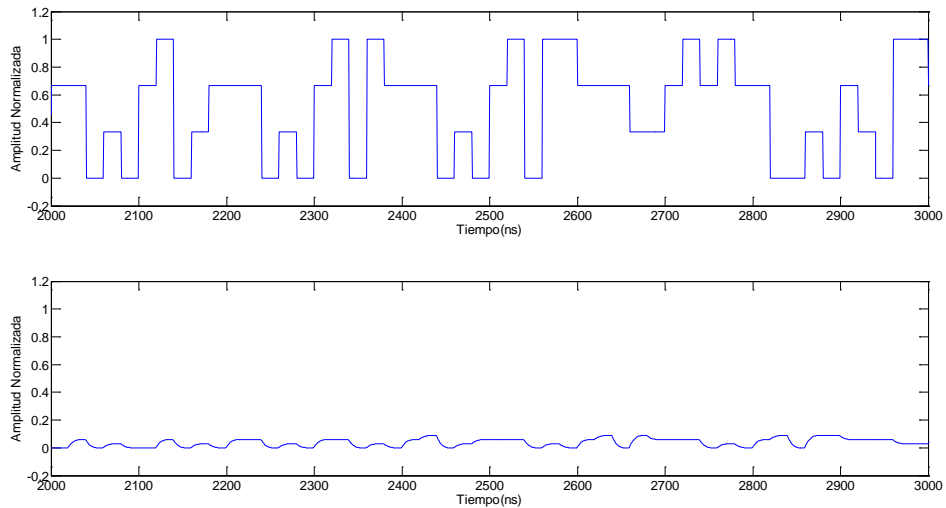


Figura 4.28: Señal de entrada frente a salida para una señal PAM de 4 niveles y tramos de 30m de fibra óptica.

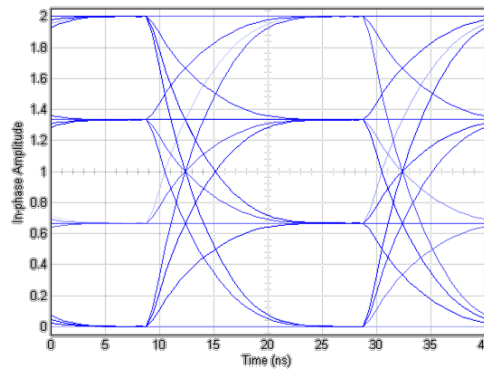


Figura 4.29: Diagrama de ojo para una señal PAM con 4 niveles y tramos de fibra óptica de 30m

Como se puede observar, el introducido al aumentar la longitud de la fibra es similar al ya observado en el caso binario.

#### 4.8. Introducción de ruido

Pensando en la idea de la simulación de un sistema más realista, se va a evaluar el comportamiento del mismo sistema sujeto a un nivel de ruido y en el que se ha introducido un filtro digital paso bajo en el extremo receptor con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de ruido fuera de banda que sea posible. Los parámetros de este filtro están incluidos en el archivo inicial donde se definen el resto de características del sistema. El valor de dichos parámetros se ha elegido mediante pruebas de evaluación, como los que mejores resultados ofrecen. Se trata de un filtro de orden 7, maximalmente plano en la banda de paso y un ancho de banda igual al valor de la tasa de transmisión de símbolo,  $R_s$ .

Nuevamente, se vuelve a la situación original la que la señal PAM es de dos niveles y la longitud de los tramos de fibra de 10 metros cada uno. Se ha contaminado la señal de entrada con un ruido blanco de varianza  $20 \cdot 10^{-2}W$ .

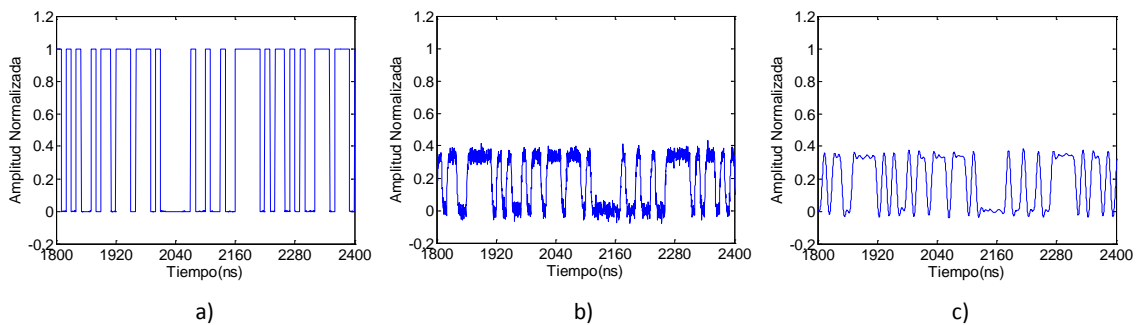


Figura 4.30: a) Señal de entrada al sistema; b) señal recibida contaminada con ruido; c) señal tras el filtro receptor

Representando las señales temporales de entrada, ruidosa y filtrada se pone de manifiesto que se ha contaminado la señal con ruido y que el filtro consigue limpiarla de manera que la detección se mejora mucho frente al caso de no haber filtro.

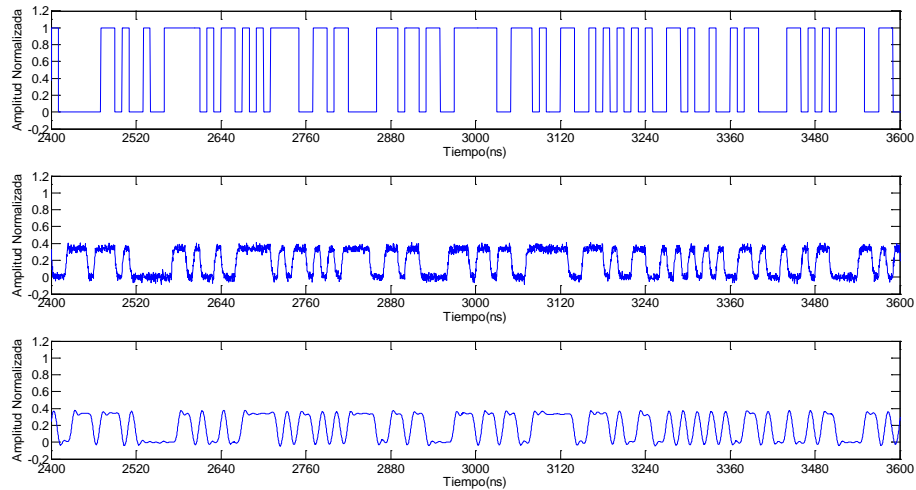


Figura 4.31: Representación de la señal de entrada frente a la señal ruidosa y la filtrada

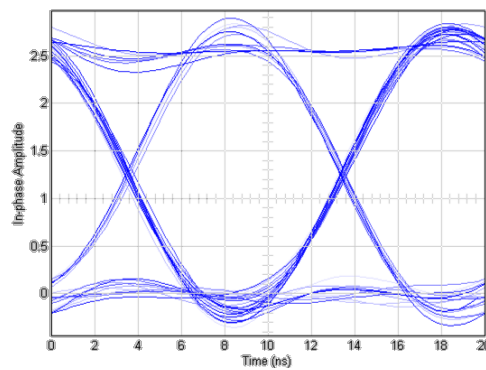


Figura 4.32: Diagrama de ojo para una señal ruidosa con varianza de ruido  $20 \cdot 10^{-2} W$

Para este caso el diagrama de ojo aparece mucho más redondeado. Este efecto es debido al efecto del filtro en el receptor, que elimina en gran medida el ruido pero también filtra las componentes de alta frecuencia de la señal.



# Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En la primera parte de este capítulo se recogen las conclusiones que se pueden extraer de la realización de este proyecto fin de carrera. En la segunda parte, se proponen líneas futuras de trabajo y posibles mejoras a realizar.

## **5.1. Conclusiones del PFC**

El objetivo de este proyecto fin de carrera era la creación de una librería de bloques en Simulink para poder simular y analizar sistemas basados en fibra óptica de plástico.

Inicialmente se han adquirido conocimientos previos sobre la POF y su modelo matricial asociado. Se ha decidido que la variable a propagar por el sistema sea esta matriz de potencia óptica. Como novedad en este proyecto, la matriz incluye además de las características espacio-temporales del sistema de fibra, las características temporales de la señal a transmitir. En este trabajo se ha logrado la integración de este modelo matricial de la propagación de la potencia óptica a lo largo de la cadena de transmisión.

Se han desarrollado la programación de los bloques que modelan los componentes de un sistema de comunicaciones basado en fibra óptica de plástico. Esta implementación se ha realizado en modo *frame*, lo que ha permitido evitar problemas en los extremos de las tramas y acelerar la ejecución de las simulaciones.

Tras realizar diversas simulaciones en sistemas creados para las pruebas en los que se han variado tanto los parámetros de transmisión, como los propios de los bloques, se puede concluir que se ha comprobado el correcto funcionamiento de los bloques incluidos en la nueva librería. Además, estas simulaciones han permitido comprobar la utilidad de la librería.

## **5.2. Posibilidad de continuación y mejora del trabajo.**

Este proyecto ha sido elaborado en su totalidad de forma teórica mediante el trabajo de laboratorio que supone la programación de la librería y la simulación de casos de prueba para los que también se han usado bloques propios de Simulink.

Una posible mejora podría ocuparse de perfeccionar los subsistemas transmisor y receptor eléctricos, haciéndolos totalmente propios para tener acceso a todas las variables involucradas en el proceso y también para hacerlo totalmente adaptativo a una señal real de entrada; además de conseguir que sean más robustos. Así mismo, resultaría interesante añadir otras funcionalidades a alguno de los bloques de nuestra librería POF, como por ejemplo distintos tipos de distribuciones espaciales de la fuente, distintos tipos de filtrado espacial en el receptor o filtrado frecuencial introducido por el receptor. Por otra, el modelo matricial en el que se basa este proyecto está en continua mejora y ampliación, introduciéndose nuevos componentes y efectos que también podrían incluirse en la librería Simulink creada.

Como línea de trabajo futuro, se puede aprovechar la potencia que nos proporciona la librería creada en este proyecto para evaluar la aplicación de distintas técnicas de transmisión a sistemas basados en POF. En este sentido, se podría estudiar la introducción de técnicas de ecualización y de corrección de errores. Este proceso necesita de una documentación previa sobre las técnicas existentes y aplicables, implementación y simulación para evaluar los resultados.

### **5.3. Valoración del trabajo**

De acuerdo con los objetivos fijados para este proyecto, se han creado unos bloques de Simulink para poder simular sistemas POF y por tanto, estudiarlos de una manera más sencilla y menos costosa tanto en tiempo, trabajo y dinero que si hubiera que implementarlos físicamente.

La primera fase fue la documentación, muy necesaria para tener conocimiento de las características del tipo de fibra con el que se iba a trabajar y del entorno de simulación que se iba a usar para la implementación. Luego, se creó la librería con los bloques requeridos y por último se idearon varias configuraciones sencillas para probar el correcto funcionamiento de cada elemento.

El resultado de este proyecto fin de carrera ha sido satisfactorio, ya que se han cumplido todos los objetivos planteados inicialmente.

A nivel personal, este proyecto final de carrera me ha permitido aplicar muchos conceptos aprendidos durante los estudios. Además los he ampliado en lo que refiere a las comunicaciones ópticas, más concretamente en el campo de la fibra óptica de plástico. Ha supuesto un reto implementar un simulador para estas comunicaciones en Simulink, un entorno de programación desconocido para mí hasta el comienzo de este trabajo, aunque estrechamente ligado a Matlab, con el cual sí se ha tenido estrecha relación a lo largo de la carrera.

Para concluir, estoy satisfecha con el trabajo realizado y el resultado obtenido con él.

# Bibliografía

- [1] "Domestic multimedia network based on POF". J. Mateo, A. Oca, M. A. Losada, J. Zubia. Santa Clara, USA : s.n., 2008. 17th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications.
- [2] "Matrix method to solve the differential power flow equation in the frequency domain". J. Mateo, M. A. Losada, A. López. 2010. 12th Intl. Conf. on Transparent Optical Networks.
- [3] S. Loquai, R. Kruglov, B. Schmauss, C. A. Bunge, F. Winkler, O. Ziemann, E. Hartl, T. Kupfer: Comparison of Modulation Schemes for 10.7 Gb/s Transmission Over Large-Core 1 mm PMMA Polymer Optical Fiber, *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 13, pp. 2170-2176, 2013.
- [4] U. H. P. Fischer, M. Haupt and M. Joncic, "Optical Transmission Systems Using Polymeric Fibers", *In Tech Review* (2011).
- [5] Paul Polishuk, "Plastic Optical Fibers Branch Out", *IEEE Communications Magazine*, 140-148 (2006).
- [6] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum: Application of Polymer Optical and Glass Fibers, in *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, Ed., Springer, 2nd edition, 2008.
- [7] A. López, M.A. Losada, J. Mateo, "Polymer Optical Fibers, POF", en el libro *Optical Communication and Related Microwave Techniques*, John Wiley & Sons (2015).
- [8] El libro de Olaf Ziemann; O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum. "POF Handbook". ed. 2nd. s.l. : Springer, 2008.
- [9] Gloge, D. "Optical Power Flow in Multimode Fibers". 1972.
- [10] "Impulse response of clad optical multimode fibers". s.l. : 52, 1973. pags. 801-816. *Bell Syst. Tech. J.*
- [11] M. Osta, M. A. Losada. "Análisis de los efectos de un scrambler sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico de salto de índice mediante el modelo matricial de propagación". Zaragoza : s.n., 2010.
- [12] 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).
- [13] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, N. Madamopoulos, "Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System", *Journal of Lightwave Technology*, 31(3), 468-475 (2013).
- [14] Alicia López, M. Ángeles Losada, Javier Mateo. "Simulation Framework for POF-based Communication Systems". Photonic Technologies Group, i3A University of Zaragoza, Spain
- [15] J. 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)

[16] Simulink. "Simulation and model-based design"

[17] Simulink "Getting Started Guide"

[18] Simulink "Developing Sfunctions"



# Anexo I: CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA GH Y CONECTOR VL.

En este anexo se exponen las hojas de características la fibra GH y del conector VL, con los que se han realizado las simulaciones de los ejemplos prácticos presentados en capítulos anteriores.

## I.1 Mitsubishi, GH-4001

### ESKA™ High-performance Plastic Optical Fiber: **GK-40**

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

May, 2001

Structure		
Core Material	Polymethyl-Methacrylate Resin (PMMA)	
Cladding Material	Fluorinated Polymer	
Core Refractive Index	1.49	
Numerical Aperture	0.5	
Refractive Index Profile	(Step Index)	
Attenuation (db/m)	0.15	
Approximate Weight (g/m)	1.0	
	Unit	Typical
Core Diameter	μm	980
Overall Diameter	μm	1000
Fiber Diameter Tolerance	+/- 6%	

Packaging	
Spool Length (m)	5,250
N weight on spool (kg)	6.6
Spool Weight (kg)	1.4
Carton Size	315 X 315 X 215
Carton G Weight (kg)	8.0
Fiber Code	GK40
Cable Code	GH4001/4002

Applications: Sensing	
GK grade fibers are typically used for sensing temperatures, speed, liquidity levels and positioning. In addition, medical applications are popular, as are applications where tight bends are required.	

Performance		Criteria for Acceptance and/or Test Conditions	Unit	Values
Temperature Range		No deterioration in optical properties *	°C	-55 – 85
Operating Temperature Under Conditions of High Humidity		No deterioration in optical properties [95% RH] **	°C	=<75
Optical Properties	Transmission Loss	650nm collimated light (standard conditions) [10m – 1m cutback]	dB/km	=<150
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss increment =< 0.5dB [Quarter bend]	mm	=>20
	Tensile Strength	Tensile force at yield point [JIS C 6861]	N	=>65

Notes: Performance tested in conditions cooler than 25°C unless otherwise indicated

\* Attenuation change <10% after 1000 hours

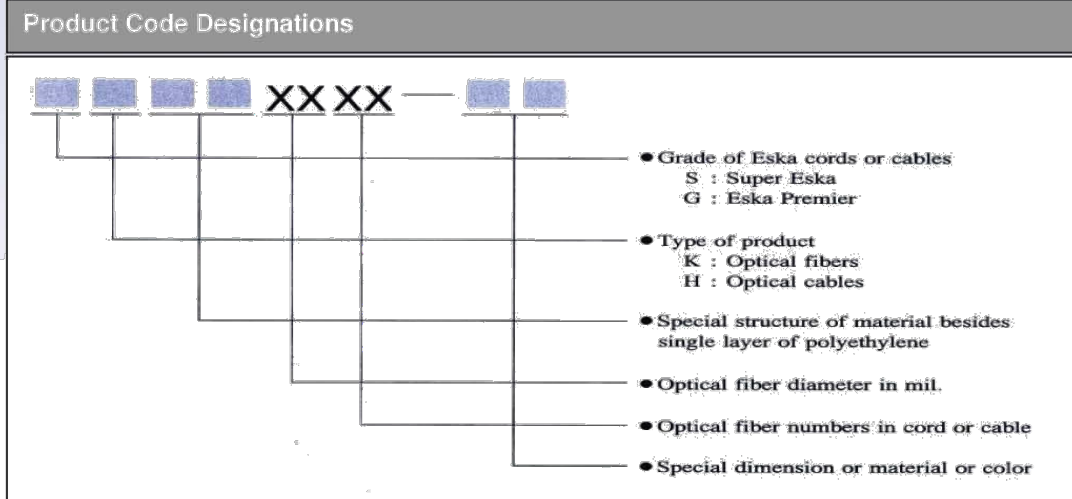
\*\* Attenuation change <10% after 1000 hours, except when due to absorbed water

## ESKA™ Plastic Fiber Optic & Cable General Technical Information

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

Product Line-up					
Application	Lighting	Sensing	Industrial Data Com	High Bandwidth	Heat Resistance
Grade	ESKA™	SUPER ESKA™	ESKA PREMIER™	ESKA MEGA™	ESKA™ for high temperatures
Fiber Code	CK	SK	GK	Not available	Not available
Cable Code	Not available	SH	GH	MH	BH
Refractive Index	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
Numerical Aperture	0.5	0.5	0.5	0.3	0.58
Temperature Range	-55 °C ~ 70 °C	-55 °C ~ 70 °C	-55 °C ~ 85 °C	-55 °C ~ 85 °C	-55 °C ~ 105 °C
Sample Item	CK40	SK40	GK40	MH4001	BH4001
Attenuation <sup>1</sup>	<0.20dB/m	0.15dB/m	<0.15dB/m	<0.16dB/m	<0.20dB/m

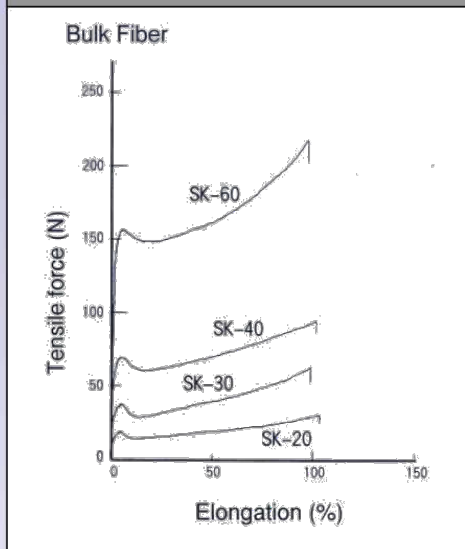
<sup>1</sup> Attenuation is measured at 650nm collimated light. Note that attenuation and some other specifications described here will change based on the diameter of the fiber and the material used for the cable jacket



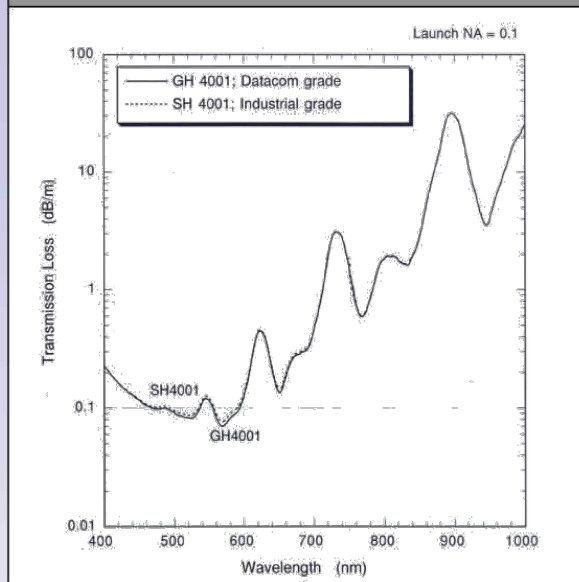
The information contained herein is presented as a guide to product selection. It is subject to change without notice, and should not be regarded as a representation, warranty or guarantee with regard to the quality, characteristics or use of this product

# **ESKA™ Plastic Fiber Optic & Cable General Technical Information** Manufactured by Mitsubishi Rayon Co., Ltd. Marketed and sold by Mitsubishi International Corporation

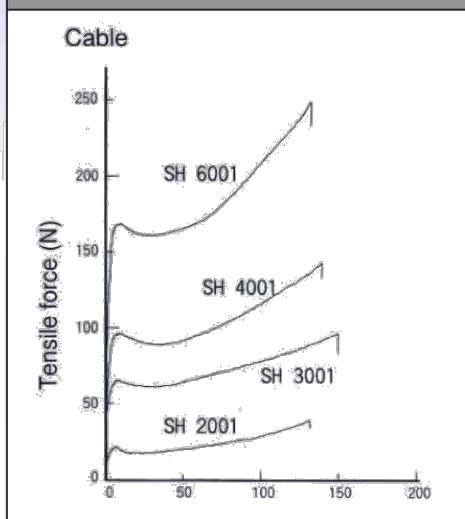
**Tensile Characteristics: Bulk Fiber**



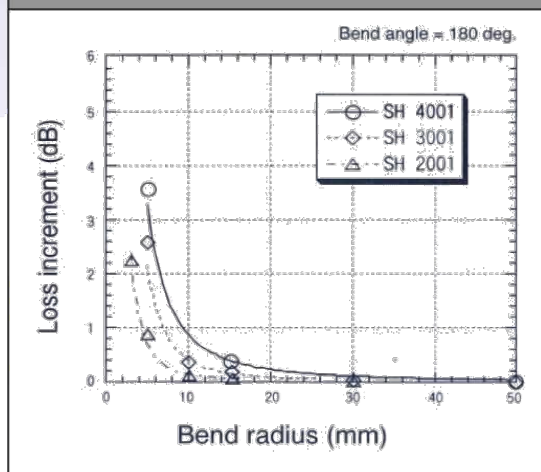
**Typical Transmission Loss Spectrum** Launch NA=0.1



**Tensile Characteristics: Cable**



**Bending Loss**





## I.2 Conector VL

### 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  $\mu$ m polish terminations ensure high optical coupling efficiency
- ◆ Assembly processes exceed Avago recommended procedures

# Anexo II: EJEMPLO PRÁCTICO DE PROGRAMACIÓN DE BLOQUES

En este anexo se explica detalladamente, como ejemplo, el código fuente del bloque que modela la fibra.

```
function fibra(block)

setup(block);

%endfunction

function setup(block)

global F X %variables globales cogidas del archivo "parametros"

    % Register number of ports
    block.NumInputPorts = 1;%Puerto de entrada
    block.NumOutputPorts = 1;%Puerto de salida

    % Setup port properties to be inherited or dynamic
    block.SetPreCompInpPortInfoToDynamic;
    block.SetPreCompOutPortInfoToDynamic;

    % Override input port properties
    block.InputPort(1).DatatypeID = 0; %Define los datos de entrada de
    tipo doble
    block.InputPort(1).Complexity = 'Complex';%Define la entrada de tipo
    complejo

    % Override output port properties
    block.OutputPort(1).DatatypeID = 0; %Define los datos de salida de
    tipo doble
    block.OutputPort(1).Complexity = 'Complex';%Define la salida de
    tipo complejo

    SetOutPortDims(block,1,[length(X),length(F)]); %Dimensiones del
    Puerto de salida

    % Register parameters
    block.NumDialogPrms = 2; %Tipo de fibra y Longitud
    block.DialogPrmsTunable = {'Nontunable','Nontunable'}; %No se
    permite modificar los parámetros durante la simulación

    block.SampleTimes = [-1 0]; % Frecuencia de muestreo heredada del
    bloque anterior

    %Declaración de los métodos que se van a usar
    block.RegBlockMethod('CheckParameters', @CheckPrms);
    block.RegBlockMethod('SetInputPortDimensions', @SetInpPortDims);
    block.RegBlockMethod('SetOutputPortDimensions', @SetOutPortDims);
    block.RegBlockMethod('PostPropagationSetup', @DoPostPropSetup);
    block.RegBlockMethod('ProcessParameters', @ProcessPrms);
```

```

block.RegBlockMethod('Start', @Start);
block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs);
block.RegBlockMethod('Terminate', @Terminate);

function CheckPrms(block) %Este método comprueba que los parámetros
introducidos son válidos, sino muestra mensaje de error

if block.DialogPrm(2).Data < 0 %Evalúa si el parámetro 2
(longitud),es menor que cero,caso en el que se emitirá un mensaje de
error
    disp('Parametro invalido')
    DASTudio.error('Parametro invalido');

end
%endfunction

function ProcessPrms(block)

    block.AutoUpdateRuntimePrms;

%endfunction

function SetInpPortDims(block, idx, di) %Fija las dimensiones del
puerto de entrada

    block.InputPort(idx).Dimensions = di;
% block.OutputPort(1).Dimensions = di; %comentado para evitar que
entrada y salida tengan las mimas dimensiones.y así poder
modificarlas,teniendo mas libertad

% %endfunction

function SetOutPortDims(block, idx, di)%Fija las dimensiones del
puerto de salida

    block.OutputPort(idx).Dimensions = di;
% block.InputPort(1).Dimensions = di;%comentado para evitar que
entrada y salida tengan las mimas dimensiones

%endfunction

function DoPostPropSetup(block) %Guarda en memoria las variables
definidas aquí
    block.NumDworks = 1; %guardaremos la longitud de la fibra

    block.Dwork(1).Name          = 'longitud';
    block.Dwork(1).Dimensions    = 1;
    block.Dwork(1).DatatypeID    = 0;          % double
    block.Dwork(1).Complexity    = 'Real'; % real
    block.Dwork(1).UsedAsDiscState = true;

    %% Register all tunable parameters as runtime parameters.
    block.AutoRegRuntimePrms;

%endfunction

```

```
function Start(block) % Asocia los parámetros recogidos del cuadro de
diálogo a los registros (Dworks) definidos

    block.Dwork(1).Data = block.DialogPrm(2).Data;% longitud de la
fibra,segundo parámetro que se pide al usuario, se asocia a la palabra
de trabajo 1

%endfunction

function Outputs(block)%Método que realiza todas las operaciones del
bloque y proporciona la salida.

    global X F %Variables globales para la función Outputs

    type = block.DialogPrm(1).Data; %Asocia a la variable tipo el
parámetro que se ha introducido en el cuadro de diálogo
    switch type % y en función de su valor elige una fibra u otra.
        case 1
            type = 'GH';%selecciona la fibra GH
        case 2
            type = 'HFB';
        case 3
            type = 'PGU';
        case 4
            type = 'B1';
        case 5
            type = 'B2';
        case 6
            type = 'B3';
    end
    L = block.Dwork(1).Data; %Longitud de la fibra
    P = block.InputPort(1).Data;% Matriz de potencia óptica que entra
al bloque;señal de entrada

    z=z+L;
    L=2*L;

    load(type)%Carga el tipo de fibra, con esto se caraga en el
espacio de variables de Matlab la matriz característica de la fibra
correspondiente.

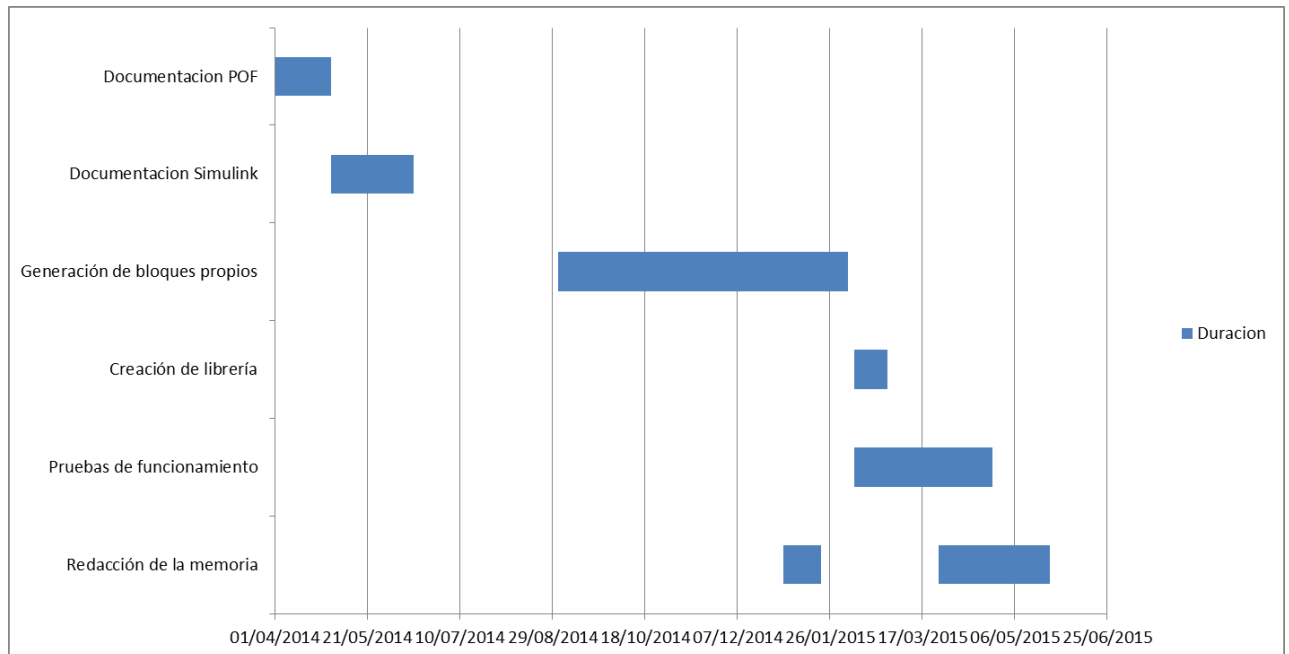
    for kk=1:length(F)
        P(:,kk)=(M(:, :, kk)^L)*P(:,kk); %Cálculo de la nueva matriz de
potencia óptica que se propagará al siguiente bloque, a partir de la
de entrada y de la matriz característica de la fibra
    end

    block.OutputPort(1).Data =P; %Asocia a la salida la matriz de
potencia óptica obtenida, que como se indica, saldrá por el puerto 1
del bloque.

%endfunction

function Terminate(block)%Método que termina la ejecución del código.
%endfunction
```

## Anexo III: EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PROYECTO: Diagrama de Gantt



En este diagrama se muestra la evolución temporal que se ha seguido a lo largo de este proyecto final de carrera

