

## Trabajo Fin de Grado

Técnicas avanzadas de transmisión para el aumento de la eficiencia espectral en fibra óptica de plástico (POF)

Advanced transmission techniques for higher spectral efficiency in plastic optical fiber (POF)

Autor

Guillermo Ramos García

Director

David Izquierdo Núñez

Ponente

Alicia López Lucia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Junio 2019

## AGRADECIMIENTOS

Al programa Mobility City por la concesión de una beca de apoyo a este trabajo de fin de grado.

A David Izquierdo, Alicia López y M<sup>a</sup> Ángeles Losada por su ayuda durante la realización del trabajo.

A mi familia, amigos y novia por su apoyo incondicional durante los cuatro años de la carrera.

# TÉCNICAS AVANZADAS DE TRANSMISIÓN PARA EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL EN FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO (POF)

## RESUMEN

Este trabajo se enmarca dentro de la investigación llevada a cabo por el grupo de tecnologías fotónicas (GTF) de la Universidad de Zaragoza con el objetivo del aumento de la tasa de transmisión y la eficiencia espectral en comunicaciones con fibra óptica de plástico. La fibra óptica de plástico resulta atractiva para ciertas aplicaciones especialmente por su bajo coste y su fácil manipulación. Por ello se ha empezado a introducir en aplicaciones de corta distancia como en automóviles o aviones dado que su elevada atenuación y dispersión modal hacen su uso imposible en enlaces de mayor distancia. Con la implementación de este tipo de fibra en sistemas de transmisión el compromiso que va a existir es el de conseguir tasas de transmisión aceptables sin aumentar la complejidad del sistema excesivamente. Esto es así dado que el uso de fibra óptica de plástico nace con el objetivo de simplificar y abaratar los sistemas de transmisión, por lo que complicar en exceso los demás elementos del mismo sería contradictorio.

A pesar de esto, la única manera de verificar la rentabilidad del uso de técnicas avanzadas de modulación es aplicándolas en montajes reales para el posterior análisis de las ganancias que reporta el uso de dichas técnicas frente a la desventaja que supone su mayor complejidad técnica. Este va a ser el objetivo del trabajo. Para ello primeramente se explicarán una serie de conceptos teóricos para el fácil entendimiento de las medidas que se van a llevar a cabo. Posteriormente se realizará un análisis de los experimentos llevados a cabo hasta el momento con fibra óptica de plástico, resumiendo cuáles han sido las tasas de transmisión máximas alcanzadas y las técnicas de modulación y características de los sistemas con los que se ha logrado. Para, por último, tratar de mejorar dichos resultados empleando tanto técnicas de modulación más básicas como otras más avanzadas, así como diferentes tipos de fibra óptica de plástico; pudiendo analizar las ventajas reales que supone cada solución frente a las demás en términos de tasa de transmisión, eficiencia espectral y complejidad del sistema.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1. MOTIVACIÓN .....	8
1.2. OBJETIVO .....	8
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	9
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>10</b>
2.1. FIBRA ÓPTICA .....	10
2.1.1. ATENUACIÓN .....	10
2.1.2. DISPERSIÓN .....	11
2.1.3. EFECTOS NO LINEALES.....	11
2.2. FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO (POF).....	11
2.3. EMISORES Y RECEPTORES ÓPTICOS .....	14
2.4. FORMATOS DE MODULACIÓN .....	15
2.4.1. PULSE AMPLITUDE MODULATION (PAM).....	15
2.4.2. DISCRETE MULTITONE MODULATION (DMT) .....	17
2.4.3. CARRIERLESS AMPLITUDE AND PHASE MODULATION (CAP) .....	19
2.4.4. MULTIBAND CAP .....	21
2.4.5. ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM).....	22
2.4.6. VENTAJAS DE LA DIVISIÓN EN BANDAS DEL ESPECTRO.....	24
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>25</b>
3.1. MONTAJE EXPERIMENTAL .....	25
3.1.1. PARTE ÓPTICA .....	26
3.1.1.1. Emisor.....	26
3.1.1.2. Receptor .....	27
3.1.1.3. Fibra óptica de plástico (POF).....	27
3.1.2. PARTE ELECTRÓNICA .....	30
3.1.2.1. AWG (Arbitrary Waveform Generator) .....	30
3.1.2.2. Osciloscopio.....	31
3.1.2.3. Amplificador .....	31
3.1.2.4. Fuentes de alimentación .....	32
3.2. ALGORITMO DE <i>BITY POWER LOADING</i> .....	33
3.3. PROCESADO DE LA SEÑAL EN MATLAB .....	36
3.3.1. NRZ Y PAM.....	36
3.3.2. CAP .....	37
3.3.3. MULTI-CAP.....	38
3.3.4. OFDM .....	39
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
4.1. PAM (NRZ BINARIO Y MULTINIVEL) Y CAP .....	40
4.2. MULTICAP Y OFDM .....	44
<b>5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b> .....	<b>51</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	51

5.2. LÍNEAS FUTURAS.....	52
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO I: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL ENLACE POF .</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO II: CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO III: ELECCIÓN DEL AMPLIFICADOR DE RF.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO IV: ECUALIZACIÓN EN EL RECEPTOR: DFE.....</b>	<b>77</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA 2.1. ESTRUCTURA TÍPICA DE LA FIBRA ÓPTICA.....	10
FIGURA 2.2. ATENUACIÓN FIBRAS OM-GIGA Y ESKA EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA [2] .....	12
FIGURA 2.3. PROPAGACIÓN DE LOS MODOS EN UNA FIBRA DE SALTO DE ÍNDICE (IZQUIERDA) Y EN UNA FIBRA DE GRADIENTE DE ÍNDICE (DERECHA) [2].....	13
FIGURA 2.4. PERFILES DE ÍNDICE PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE POF [1].....	13
FIGURA 2.5. SEÑALES NRZ (IZQUIERDA) Y 8PAM (DERECHA) EN TIEMPO Y FRECUENCIA.....	16
FIGURA 2.6. ESTADO DEL ARTE TASAS NRZ Y PAM .....	17
FIGURA 2.7. ESQUEMA TRANSMISOR Y RECEPTOR DMT .....	18
FIGURA 2.8. ESTADO DEL ARTE TASAS DMT.....	19
FIGURA 2.9. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO CAP [23] .....	20
FIGURA 2.10. (A)RESPUESTA IMPULSIONAL FILTRO 1, $F_1$ (B) RESPUESTA IMPULSIONAL FILTRO 2, $F_2$ (C) RESPUESTA FRECUENCIAL [23] .....	20
FIGURA 2.11. ESTADO DEL ARTE TASAS CAP .....	21
FIGURA 2.12. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO MULTICAP [23] .....	22
FIGURA 2.13. ESPECTRO DE LA SEÑAL MULTICAP .....	22
FIGURA 2.14. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO TRANSMISOR OFDM.....	23
FIGURA 2.15. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO RECEPTOR OFDM .....	23
FIGURA 3.1. ESQUEMA BÁSICO DEL MONTAJE.....	25
FIGURA 3.2. ESQUEMA CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS .....	25
FIGURA 3.3. CURVA DE FUNCIONAMIENTO DEL LASER L658P040 .....	26
FIGURA 3.4. ESPECTRO OBTENIDO CON EL VNA CON EL GRAVITON SPD-2 COMO RECEPTOR Y DOS EMISORES DISTINTOS....	27
FIGURA 3.5. RESPUESTA FRECUENCIAL DEL GRAVITON SPD-2 .....	27
FIGURA 3.6. CONECTOR ST .....	28
FIGURA 3.7. MONTAJE PARA LAS MEDIDAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO.....	29
FIGURA 3.8. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LAS POFs MEDIDAS CON EL VNA .....	29
FIGURA 3.9. VARIACIÓN ESPECTRO DE LA FIBRA MULTICORE SEGÚN LA POSICIÓN DE LA FIBRA (INYECCIÓN DE LA LUZ) .....	30
FIGURA 3.10. RESPUESTAS FRECUENCIALES DE LOS AMPLIFICADORES DE RF MEDIDAS CON EL VNA.....	31
FIGURA 3.11. RESPUESTA FRECUENCIAL DEL SISTEMA AMPLIFICADOR-TRANSMISOR-RABILLO-RECEPTOR.....	32
FIGURA 3.12. ESQUEMA DEL SETUP COMPLETO PARA REALIZACIÓN DE LAS MEDIDAS .....	33
FIGURA 3.13. DEFINICIÓN DEL EVM SEGÚN LA DESVIACIÓN DEL SÍMBOLO RECIBIDO RESPECTO AL SÍMBOLO TEÓRICO .....	34
FIGURA 3.14. UMBRALES DE EVM PARA LA ASIGNACIÓN DE LAS CONSTELACIONES .....	34
FIGURA 3.15. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO DE BIT Y POWER LOADING .....	35
FIGURA 3.16. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO DE MODULACIÓN PAM EMPLEADO EN LAS MEDIDAS DE LABORATORIO .....	37
FIGURA 3.17. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO DE CAP EMPLEADO EN LAS MEDIDAS DE LABORATORIO.....	38
FIGURA 3.18. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO DE MULTICAP EMPLEADO EN LAS MEDIDAS DE LABORATORIO.....	38
FIGURA 3.19. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE OFDM EMPLEADO EN LAS MEDIDAS DE LABORATORIO.....	39
FIGURA 4.1. RELACIÓN BER CON TASA DE BITS PARA LAS CUATRO FIBRAS.....	41
FIGURA 4.2. TASAS MÁXIMAS ALCANZABLES CON FORMATOS DE MODULACIÓN DE BANDA ÚNICA.....	41
FIGURA 4.3. EFICIENCIA ESPECTRAL Y CONSTELACIONES PARA LAS TÉCNICAS DE MODULACIÓN SENCILLAS.....	42
FIGURA 4.4. CONSTELACIONES Y RESPUESTA FRECUENCIAL (SEÑAL TRANSMITIDA EN ROJO Y RECIBIDA EN AZUL), PARA NRZ (A) Y 4PAM (B) EN FIBRA MULTICORE POF DE 50 METROS.....	43
FIGURA 4.5. CONSTELACIONES Y RESPUESTA FRECUENCIA (SEÑAL TRANSMITIDA EN ROJO Y RECIBIDA EN AZUL), PARA CAP16 EN FIBRA SIPOF-GH (A), GIPOF (B), SIPOF-MH (C) Y MULTICORE-POF (D).....	43
FIGURA 4.6. CONSTELACIONES DE LAS BANDAS EMPLEANDO MULTICAP, BIT LOADING Y POWER LOADING EN FIBRA SIPOF GH DE 50 METROS .....	44
FIGURA 4.7. ESPECTRO DE LAS SEÑALES TRANSMITIDA (ROJO) Y RECIBIDA (AZUL) CON MULTICAP CON BANDAS DE 100MHZ EN FIBRA SIPOF GH DE 50 METROS.....	45
FIGURA 4.8. TASA DE BITS CON MULTICAP CON BIT LOADING, CON BIT Y POWER LOADING Y CON FORMATOS SENCILLOS PARA DIFERENTES FIBRAS DE 50 METROS.....	46
FIGURA 4.9. EFICIENCIA ESPECTRAL CON MULTICAP CON BIT LOADING, CON BIT Y POWER LOADING Y CON FORMATOS SENCILLOS PARA DIFERENTES FIBRAS DE 50 METROS.....	46
FIGURA 4.10. CONSTELACIONES CON MULTICAP PARA DIFERENTE TAMAÑO DE BANDA (A) 200 MHz (B) 100 MHz (C) 50 MHz EN FIBRA GIPOF DE 50 METROS.....	47

FIGURA 4.11. ESPECTRO FRECUENCIAL DE LAS SEÑALES TRANSMITIDA (ROJO) Y RECIBIDA (AZUL) CON MULTICAP PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE BANDA (A) 200 MHz (B) 100 MHz (C) 50 MHz EN FIBRA GIPOF DE 50 METROS.....	47
FIGURA 4.12. TASA Y EFICIENCIA ESPECTRAL PARA MULTICAP CON DIFERENTES TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN FIBRA GIPOF DE 50 METROS.....	48
FIGURA 4.13. CONSTELACIONES CON OFDM CON 31 BANDAS Y 2GHz DE ANCHO DE BANDA INICIAL EN FIBRA GIPOF DE 50 METROS.....	49
FIGURA 4.14. ESPECTRO FRECUENCIAL DE LAS SEÑALES TRANSMITIDA (ROJO) Y RECIBIDA (AZUL) CON OFDM CON 31 BANDAS Y 2 GHz DE ANCHO DE BANDA INICIALES EN FIBRA GIPOF DE 50 METROS.....	49
FIGURA II.1. RESPUESTA FRECUENCIAL FIBRAS 50 METROS SIN NORMALIZACIÓN.....	73
FIGURA II.2. RESPUESTA FRECUENCIAL FIBRAS GI-POF DIFERENTES LONGITUDES.....	74
FIGURA III.1. RESPUESTA FRECUENCIAL DEL SISTEMA ÓPTICO COMPLETO CON CADA AMPLIFICADOR PARA CADA TIPO DE FIBRA.....	75
FIGURA III.2. RESPUESTA FRECUENCIAL DEL SISTEMA ÓPTICO COMPLETO CON CADA FIBRA PARA CADA AMPLIFICADOR.....	76
FIGURA IV.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN DFE.....	77
FIGURA IV.2. SÍMBOLOS RECIBIDOS ANTES (A) Y DESPUÉS (CORREGIDOS) (B) DEL DFE.....	78

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN

La fibra óptica es un medio de transmisión que ha cobrado grandísima importancia en el mercado de las telecomunicaciones debido a que cumple las características requeridas para adaptarse a las necesidades de ancho de banda. La demanda de tasas muy altas de transmisión de datos por internet llevó a la búsqueda de nuevos medios de transmisión que puedan satisfacer dicha demanda. La fibra óptica cumple con creces las condiciones. Concretamente, la fibra óptica de vidrio (GOF) consigue tasas de transmisión inalcanzables con otros medios de transmisión como el cable de cobre en distancias muy largas de cientos o miles de kilómetros. Su baja dispersión y atenuación en ciertas zonas del espectro (ventanas ópticas de transmisión) permiten alcanzar esas tasas tan demandadas.

Sin embargo, existen también otras aplicaciones de más corto alcance en las que se requieren también tasas elevadas. En estas necesidades que comienzan a aparecer por ejemplo, en automóviles o aviones, la fibra óptica de vidrio excede ampliamente el ancho de banda requerido y presenta desventajas relacionadas con su fragilidad y el coste de los componentes asociados. Por ello, en este ámbito la fibra óptica de plástico (POF) representa una mejor solución. Esta fibra supone una ventaja frente a la de vidrio en aplicaciones de corto alcance por su menor coste y sobretodo su facilidad de manejo. Asimismo, mantiene las ventajas de aquella, como la inmunidad frente a EMI. Sin embargo, la POF presenta peores características de atenuación y dispersión, lo que hace que soporte menores anchos de banda y que se pueda usar en enlaces de decenas de metros frente a los de decenas de kilómetros de la GOF. La simplicidad de este tipo de fibra hace que su uso en aplicaciones como las citadas resulte muy interesante y más favorable que otras tecnologías.

Los estudios llevados a cabo hasta el momento con fibra óptica de plástico se limitan en su mayoría al uso de técnicas de modulación sencillas. Además, la mayor parte de estos experimentos se han realizado en fibras de salto de índice (SI-POF), y muy pocos en otros tipos de fibras de plástico que pueden suponer mejoras en las tasas obtenidas como las fibras de gradiente de índice (GI-POF).

## 1.2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es introducir técnicas de modulación más avanzadas respecto a las generalmente empleadas en sistemas de transmisión con fibra óptica de plástico para demostrar o verificar sus ventajas en cuanto a eficiencia espectral y tasa máxima de transmisión. Primeramente, se pretende realizar un estudio de los formatos de modulación hasta el momento empleados con fibra óptica de plástico y cuáles han sido los resultados obtenidos con dichos formatos. Teniendo siempre en cuenta las condiciones que se emplearon en la toma de medidas.

Tras el análisis del estado del arte se pasa a la realización de las medidas propias. Para ello, primero se llevará a cabo la selección de componentes del enlace sobre el que se realizarán las medidas. La configuración del montaje experimental buscará la optimización del sistema en su conjunto tratando de seleccionar los dispositivos que mejor se adapten a las características de la POF. Tras la elección de los componentes del sistema y configuración del enlace, se llevarán a cabo las medidas experimentales pertinentes. Se comenzará por los formatos de modulación más sencillos con el objetivo de hacernos una idea de las tasas que estamos logrando con nuestro enlace respecto a las que se lograron en otros trabajos empleando esos mismos formatos de modulación. Después se pasará a emplear los formatos de modulación más avanzados para comparar los resultados con los obtenidos con las técnicas más sencillas.

El análisis de las distintas técnicas de transmisión concluye con una reflexión en cuanto al compromiso entre los avances logrados empleando las técnicas avanzadas en términos de eficiencia espectral y tasa de bits, y los inconvenientes del empleo de dichas técnicas que suponen un aumento en la complejidad del sistema.

### 1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

Como se ha explicado resumidamente en el apartado anterior la memoria se estructurará en cuatro partes diferenciadas:

- Fundamentos teóricos. En esta primera parte se explican todos los conceptos relativos a los dispositivos empleados en las medidas a realizar, en especial la fibra óptica de plástico, que se necesitan conocer previamente. Además se llevará a cabo el estudio de los formatos de modulación ya empleados hasta el momento y los resultados obtenidos con ellos. Asimismo, se explica el funcionamiento de las técnicas de transmisión que se han empleado en las medidas de laboratorio.
- Metodología. En este capítulo se exponen las decisiones tomadas en cuanto a la configuración del enlace que se va a analizar, así como el funcionamiento del mismo. Se explican las principales características de los dispositivos involucrados, así como el funcionamiento de los códigos empleados para el tratamiento de la señal.
- Resultados. En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras la toma de medidas y se lleva a cabo la reflexión sobre los beneficios del uso de técnicas de modulación avanzadas.
- Conclusiones y líneas futuras. Se exponen las conclusiones del trabajo realizado así como cuáles podrían ser los futuros experimentos a realizar como consecución de los resultados alcanzados.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. FIBRA ÓPTICA

El uso de las fibras ópticas ha crecido exponencialmente en las últimas décadas por sus múltiples ventajas frente a los tradicionales cables de cobre. Algunas de estas ventajas son:

- No se ven afectadas por interferencias electromagnéticas (EMI) dado que la información se propaga en su interior en forma de luz y esta no se ve afectada por campos electromagnéticos.
- Permiten la transmisión de datos con anchos de banda mucho más elevados que empleando cables de cobre.
- Presentan baja atenuación lo que permite aumentar considerablemente el alcance de los enlaces de telecomunicaciones.

La estructura de una fibra óptica se compone de tres partes: núcleo, revestimiento y cubierta, tal y como se muestra en la Figura 2.1. El núcleo es la capa más interna y por la que se propaga la luz. Recubriendo al núcleo encontramos el revestimiento con un índice de refracción ligeramente menor al del núcleo con el objetivo del guiado total de la luz dentro del mismo. Por último, envolviendo el revestimiento y protegiendo la fibra encontramos la cubierta.

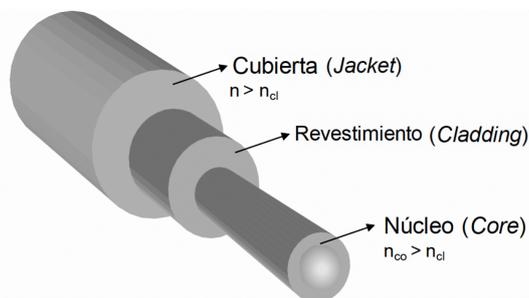


Figura 2.1. Estructura típica de la fibra óptica

En cuanto a las limitaciones de las fibras ópticas existen tres fenómenos fundamentales a tener en cuenta: la atenuación, la dispersión y los fenómenos no lineales.

#### 2.1.1. ATENUACIÓN

Se trata de la pérdida de potencia óptica en transmisión como consecuencia del paso de la luz por la fibra. Las causas de la atenuación de una fibra son muy variadas, en términos generales hablaremos de estas causas principales:

- Absorción. Se produce cuando la luz se transforma en otro tipo de energía (térmica o vibracional), y que puede ser intrínseca o extrínseca dependiendo de si es causada por el propio material o por impurezas externas.

- Difusión o scattering. Tiene lugar cuando la luz se propaga en direcciones diferentes a la dirección de propagación y parte de la potencia óptica se pierde a través del revestimiento o cubierta saliendo de la fibra.
- Radiación. Causada mayormente por curvaturas en la fibra. Parte de la energía contenida en los modos guiados se acopla a modos no guiados de la fibra y ésta se pierde.

Estas tres causas terminan determinando una curva de atenuación característica de cada fibra para las diferentes longitudes de onda. La atenuación supondrá una limitación cuando no llegue suficiente potencia óptica al receptor óptico como para poder detectar la señal enviada. Para minimizar en la medida de lo posible el efecto de la atenuación, se emplearán fuentes luminosas cuyas longitudes de onda de emisión se correspondan con los mínimos de atenuación en las curvas de atenuación de la fibra óptica.

### 2.1.2. DISPERSIÓN

Este fenómeno se debe a la diferencia en la velocidad de propagación de las distintas componentes de la señal óptica. Estas componentes pueden ser modos, longitudes de onda, polarizaciones etc. Dándose así tres subtipos de dispersión:

- Dispersión modal. Se produce en fibras en las que se propaga más de un modo, como la fibra multimodo de vidrio (MMF) o la POF.
- Dispersión cromática. Es consecuencia de las diferentes velocidades que sufren las distintas longitudes de onda.
- Dispersión por polarización. Producida por la diferencia de velocidad de las dos polarizaciones de la luz (horizontal y vertical).

El resultado de esta diferencia en la velocidad de propagación es un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos por la fibra y que supone una limitación en el ancho de banda del enlace o, lo que es lo mismo, en la tasa máxima de transmisión alcanzable.

### 2.1.3. EFECTOS NO LINEALES

La variedad de efectos no lineales que podemos encontrar con el uso de fibras ópticas es bastante elevado. Sin embargo, dado que no se va a tratar de un factor limitante cuando trabajamos con POF, simplemente mencionar algunos de los más destacables: Scattering no lineal, Efecto Kerr, Efecto Brillouin, FWM (Four Wave Mixing) etc.

## 2.2. FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO (POF)

Las fibras ópticas de plástico, también llamadas POF (*Polymer Optical Fiber* ó *Plastic Optical Fiber*), son fibras ópticas cuyo núcleo está hecho de materiales poliméricos. El interés por el uso de este tipo de fibras ópticas nace por su coste reducido pero, sobre todo, como consecuencia de su fácil manipulación y conveniencia para ciertas aplicaciones de corto alcance. Además, sus características físicas hacen de este tipo de

fibras una solución muy interesante en escenarios sensibles al coste, puesto que simplifican el acoplo a y desde la fibra en los extremos transmisor y receptor.

El material más comúnmente empleado en la fabricación del núcleo de este tipo de fibras es el PMMA (Polymethymethacrylate) con un índice de refracción de 1.492 [1]. Del mismo modo que ocurre con las fibras ópticas de vidrio, este núcleo puede ser diseñado para obtener fibras con diferentes características según su perfil de índice, o forma como varía el índice de refracción del núcleo en función de la distancia radial. En el proceso de selección de una fibra óptica de plástico para una determinada aplicación se debe atender mayormente a las dos limitaciones más significativas en las fibras ópticas: atenuación y dispersión (ya explicadas anteriormente).

Así, el primer tipo de POFs que fue desarrollado fueron las SI-POF o fibras ópticas de plástico de salto de índice (*Step-Index* POF). En las fibras SI-POF el índice de refracción se mantiene constante a lo largo de todo el núcleo, es decir, es igual independientemente de la distancia al eje de la fibra. El diámetro de este tipo de fibras es típicamente de 1 mm aunque existen fibras con diámetros distintos. En cuanto a su apertura numérica (NA), su valor en este tipo de fibras es de 0.5 y tienen una atenuación de entre 0.11 y 0.25 dB/m para la longitud de onda de 650 nm. Dicha longitud de onda es la comúnmente empleada en la transmisión de información en este tipo de fibras debido al mínimo de atenuación que presenta el PMMA para dicha longitud de onda, como podemos ver en la Figura 2.2. Se muestra la curva de atenuación para la fibra GI-POF OM-GIGA de Optimedia, que es una de las que va a ser analizadas en este trabajo, junto con otra fibra SI-POF. En ambas curvas de atenuación espectral podemos observar claramente el mínimo de atenuación en 650 nm.

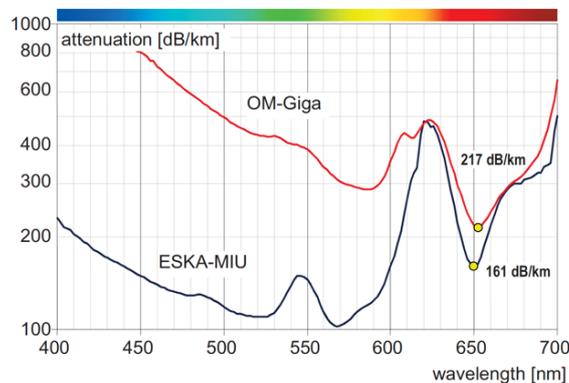


Figura 2.2. Atenuación fibras OM-GIGA y ESKA en función de la longitud de onda [2]

Como segundo tipo de POFs, según su perfil de índice, están las GI-POF (*Graded-Index* POF). Este tipo de fibras se caracterizan por un núcleo que presenta un índice de refracción que se va reduciendo progresivamente conforme nos alejamos del eje de la fibra hasta llegar al revestimiento. Las mejores características de transmisión se obtienen cuando el perfil de índice toma forma parabólica como ocurre con las fibras ópticas de vidrio de índice gradual. Con este perfil de índice gradual, se consigue que los modos que se propagan por la fibra, que en un principio sufren velocidades de propagación distintas tengan finalmente una velocidad de propagación similar. Esto es así dado que la velocidad de propagación de los modos de la fibra es proporcional al

índice de refracción del material por el que se propaga. En la Figura 2.3 observamos cómo se produce la propagación de los modos en ambos tipos de fibra.

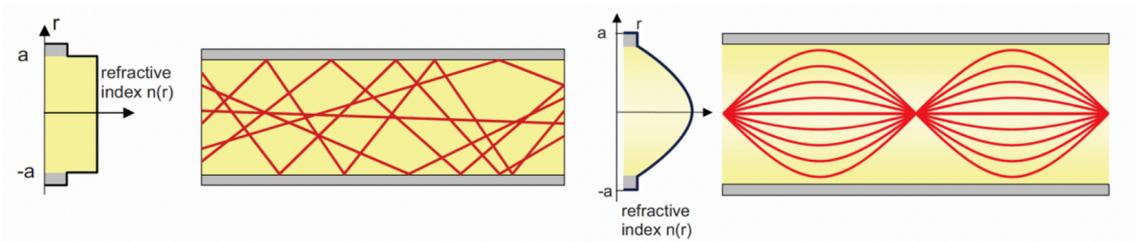


Figura 2.3. Propagación de los modos en una fibra de salto de índice (izquierda) y en una fibra de gradiente de índice (derecha) [2]

La principal diferencia entre estos dos tipos de fibra (SI-POF y GI-POF), consecuencia de sus perfiles de índice y de la correspondiente propagación de los modos, radica en cuál es el factor más limitante en un enlace. En el caso de las SI-POF es la dispersión modal, dado que la atenuación se ha podido reducir a niveles muy bajos. Sin embargo, la dispersión modal (ya explicada) supone una gran limitación en el ancho de banda de la SI-POF. El motivo es que en este tipo de fibra los modos más externos (los que se propagan con ángulos mayores) sufren importantes retardos con respecto a los modos de menor orden. Como consecuencia tenemos respuestas frecuenciales que caen rápidamente y anchos de banda de centenas de MHz. Por el contrario, las fibras de gradiente de índice (GI-POF) consiguen que la dispersión modal no sea tan significativa al hacer que los modos más externos, que tienen que recorrer trayectorias más largas, se propaguen a mayor velocidad. Así, en estas fibras se alcanzan anchos de banda mayores que con las SI-POF, del orden de GHz. Sin embargo, la atenuación en estas fibras es mayor que para las SI-POF, siendo este factor el más limitante. En la Figura 2.4 vemos como serían los perfiles del índice de refracción de algunos tipos de fibra óptica de plástico.

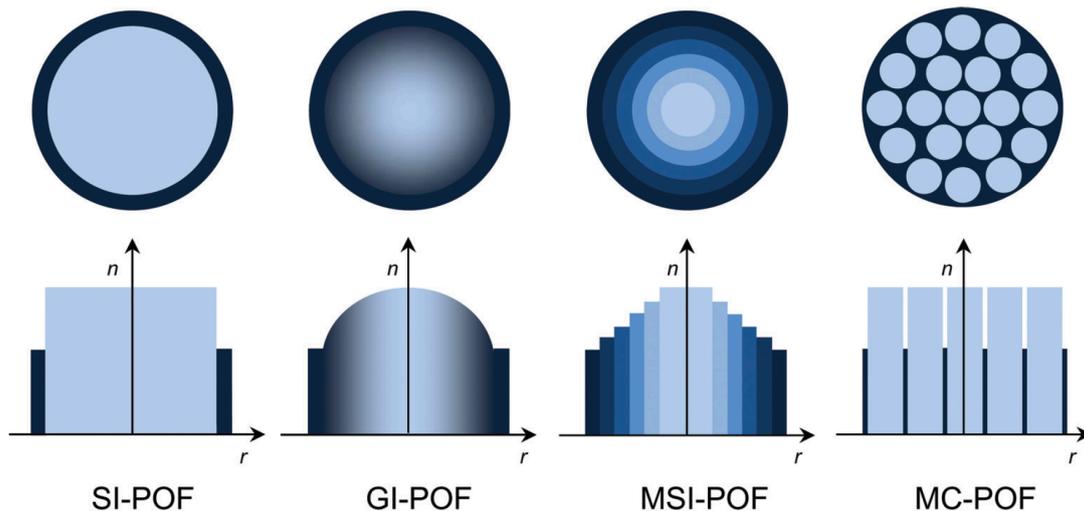


Figura 2.4. Perfiles de índice para los diferentes tipos de POF [1]

Como se puede observar en la figura, más allá de los dos tipos básicos de POF explicados, encontramos otros tipos como las fibras MSI-POF (*Multi-Step-Index POF*) cuyo objetivo es la reducción de la apertura numérica. También existen fibras con varios núcleos: MC-

POF (*Multicore POF*) que tienen el potencial de mejorar la capacidad de transmisión mediante el uso de técnicas de multiplexado espacial, pero cuyo uso real todavía no es demasiado extendido. Una desventaja de este tipo de fibra es que su respuesta frecuencial es muy dependiente de la inyección de la luz en la fibra. Por otra parte, también existen fibras fabricadas con polímeros diferentes al PMMA y que presentan menores atenuaciones. Es el caso de las fibras PF-POF (*Perfluorinated POF*) que, además se fabrican con núcleos mucho más pequeños, por lo que pierden la mayoría de ventajas inherentes a las POF tradicionales. En los experimentos y medidas que se van a realizar para este trabajo nos limitaremos al uso de fibras con núcleo de PMMA y 1 mm de diámetro, en concreto: SI-POF, GI-POF y fibras Multicore.

## 2.3. EMISORES Y RECEPTORES ÓPTICOS

Las fuentes de luz para comunicaciones ópticas están basadas en heterouniones de semiconductores cuyas ventajas son su pequeño tamaño, gran fiabilidad, alta potencia emitida, facilidad de acoplo a fibras ópticas y, sobre todo, fácil modulación de la potencia óptica a partir de una modulación de la corriente eléctrica. Estas fuentes son básicamente de dos tipos: LEDs (*Light Emitting Diodes*), basados en la emisión espontánea de luz y diodos láser, LDs (*Laser Diodes*), basados en la emisión estimulada. Los diodos láser son hoy en día las fuentes ópticas habituales para comunicaciones mientras que los LEDs se utilizan en otros ámbitos (señalización e iluminación, por ejemplo).

A diferencia de los LEDs, los fotones emitidos por un diodo láser tienen longitud de onda muy similar. Esto quiere decir que la anchura espectral de un láser es mucho menor que la de un LED. Además, los fotones emitidos por un láser tienen la misma fase, lo que supone que la emisión sea coherente a diferencia de la emisión espontánea o incoherente de los LEDs. Por último, los fotones emitidos por un diodo láser salen en la misma dirección o, dicho de otro modo, que la divergencia (apertura) de salida de la luz del láser sea bastante menor que la de un LED. Estas son las razones por las cuales en este trabajo se utilizará un láser como emisor. En el caso de enlaces ópticos con POF, será necesario que la potencia proporcionada por la fuente óptica sea lo suficientemente alta para evitar las limitaciones impuestas por la atenuación de la fibra. Además, una pequeña apertura hará que el acoplo a la fibra se produzca con menos pérdidas.

Un fotodetector es el elemento final de un sistema de comunicaciones ópticas, donde la luz inyectada por un láser a una fibra óptica se convierte de nuevo en corriente eléctrica. Los fotodetectores más adecuados para comunicaciones ópticas son aquellos basados en semiconductores o fotodiodos. Dichos fotodiodos están hechos de materiales capaces de absorber los fotones que les llegan generando una corriente eléctrica proporcional al número de fotones absorbidos. En el caso de los enlaces ópticos con POF, será necesario utilizar fotodetectores de área grande, dadas las dimensiones de la fibra y su alta apertura numérica. Este hecho limitará el ancho de banda del

detector, que junto con la velocidad de respuesta de la electrónica implicada reducirán el ancho de banda disponible en el enlace.

## 2.4. FORMATOS DE MODULACIÓN

En este apartado se explicarán las técnicas de modulación que se han empleado tradicionalmente en fibra óptica de plástico, así como las nuevas técnicas que se van a aplicar en este trabajo. Además, se analizará cuáles han sido los experimentos más destacables que se han llevado a cabo con cada técnica de modulación teniendo en cuenta siempre las condiciones en las que se ejecutaron (montaje completo), para que la comparación de resultados sea veraz y coherente.

La mayor parte de sistemas de comunicación con POF emplean un esquema de modulación de la intensidad y detección directa (IM-DD) que es la forma más sencilla de establecer un enlace de datos óptico. Sin embargo, en los últimos años la demanda de enlaces con capacidades de transmisión muy elevadas ha aumentado considerablemente, siendo este tipo de esquemas insuficientes para dicha demanda. Como consecuencia se comenzaron a aplicar técnicas de modulación avanzadas a los sistemas con POF aumentándose en gran medida las tasas de transmisión de datos. En este apartado analizaremos cuáles han sido los formatos de modulación que han sido empleados hasta el momento y cuáles han sido las tasas alcanzadas con los diferentes formatos, sirviendo de introducción a las técnicas de transmisión objeto de estudio en este trabajo.

Cuando trabajamos con POF como medio de transmisión, un punto importante a tener en cuenta es la complejidad y coste de los sistemas de modulación empleados. Por eso para las técnicas incluidas en este estado del arte, se incluye el aspecto de complejidad, que habitualmente es obviado en sistemas ópticos con fibra de vidrio.

### 2.4.1. PULSE AMPLITUDE MODULATION (PAM)

La modulación PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) es un tipo de modulación digital en la que la información modula la amplitud de la señal transmitida y es la técnica más comúnmente empleada en comunicaciones digitales. Dentro de este tipo de modulación encontramos la modulación básica de todo sistema de comunicaciones ópticas: modulación en intensidad (IM, también conocida como OOK, *On Off Keying*), que no es otra cosa que una modulación PAM de dos niveles con pulsos NRZ (None Return to Zero).

Ampliando el número de niveles (M) de nuestra señal PAM podemos incrementar fácilmente la tasa de transmisión obteniendo así una señal M-PAM. Cada nivel añadido a la señal supone duplicar el alfabeto de símbolos a transmitir y por tanto un incremento del número de bits para codificar cada símbolo. Como se puede observar en la Figura 2.5 (donde se muestran los casos de una señal PAM con dos niveles (NRZ) y otra con ocho niveles), cuanto mayor es el valor de M menor es el ancho de banda empleado para la transmisión. Esto es así, porque el periodo de símbolo aumenta con la M y por

tanto la tasa de modulación (medida en baudios) disminuye. El beneficio se resume en un aumento de la eficiencia espectral (medida en bits/s/Hz) que permite transmitir la misma tasa de datos en un ancho de banda menor.

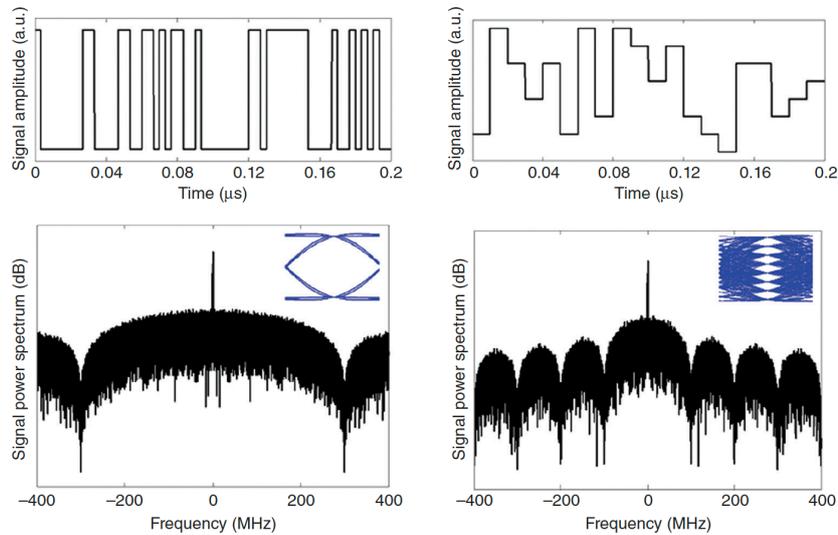


Figura 2.5. Señales NRZ (izquierda) y 8PAM (derecha) en tiempo y frecuencia

En el caso de la Figura 2.5 se observa cómo se puede transmitir con misma tasa en ambos casos (0.3 Gbps) pero empleando una tercera parte ( $\log_2 8$ ) del ancho de banda en caso de usar una modulación 8-PAM. Sin embargo, no es posible aumentar el número de niveles indefinidamente puesto que a medida que aumenta  $M$  se necesita mayor relación señal a ruido (SNR - *Signal to Noise Ratio*) para mantener la tasa de error de bit (BER - *Bit Error Ratio*).

Como ya se ha dicho, esta modulación ha sido desde el principio una de las más empleadas en sistemas con POF alcanzándose tasas de transmisión muy elevadas. Su extendido uso en dichos sistemas se debe a su sencillez de implementación comparado con otro tipo de modulaciones cuyo procesado de señal es más costoso. En la Figura 2.6 se muestra el estado del arte de las tasas alcanzadas con este tipo de modulaciones. En naranja las fibras GI-POF y en azul las SI-POF.

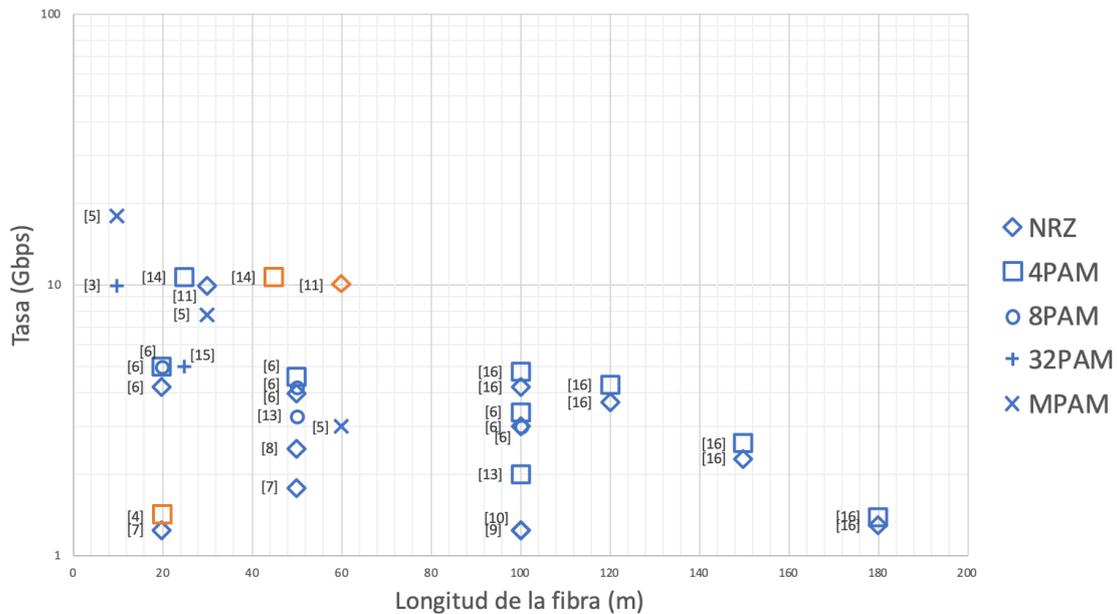


Figura 2.6. Estado del arte tasas NRZ y PAM

Como se puede observar, debido a la fuerte dispersión modal de las fibras de plástico, las máximas tasas de transmisión alcanzables disminuyen fuertemente con la longitud del enlace. En general, los enlaces objeto de estudio han estado siempre por debajo de 100 metros debido principalmente a limitaciones de atenuación. En una publicación reciente de 2018 [16] se ha conseguido superar esa longitud y llegar a valores récord de 180 metros gracias al uso de fuente ópticas de alta potencia y receptores con alta sensibilidad y buenas características frecuenciales.

La gráfica también muestra que los experimentos de transmisión que han empleado GI-POF [4], [11], [14] son mucho menos frecuentes que los que se han basado en SI-POF y en general alcanzan mayores tasas de transmisión: 10 Gb/s sobre 60 metros con modulación NRZ binaria en [11] y 10.7 Gb/s sobre 45 metros con modulación NRZ multinivel [14]. En el caso de [4], la tasa de transmisión se vio reducida puesto que el experimento contaba como fuente óptica con un VCSEL de baja potencia y se realizaba transmisión simultánea con 8 canales de radio sobre fibra LTE-A.

Por otra parte, los resultados obtenidos con SI-POF se mantienen en general por debajo de los 5 Gbps de tasa de transmisión, siendo la transmisión binaria NRZ la que peores resultados ha obtenido. Las tasas de transmisión por encima de 5 Gbps se han conseguido para enlaces de menos de 40 metros.

## 2.4.2. DISCRETE MULTITONE MODULATION (DMT)

La modulación DMT (*Discrete Multitone Modulation*) es una técnica de modulación multiportadora en la que un flujo de datos en serie se paraleliza en distintos flujos que se reparten entre las diferentes subportadoras dentro del ancho de banda total. Cada una de las subportadoras es modulada con un formato de modulación que no tiene por qué ser el mismo. El formato más comúnmente empleado para modular las

subportadoras es QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). DMT se comenzó a usar extensamente para DAB (*Digital Audio Broadcasting*) y para ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*). En la Figura 2.7 se muestra el esquema del transmisor y receptor para DMT.

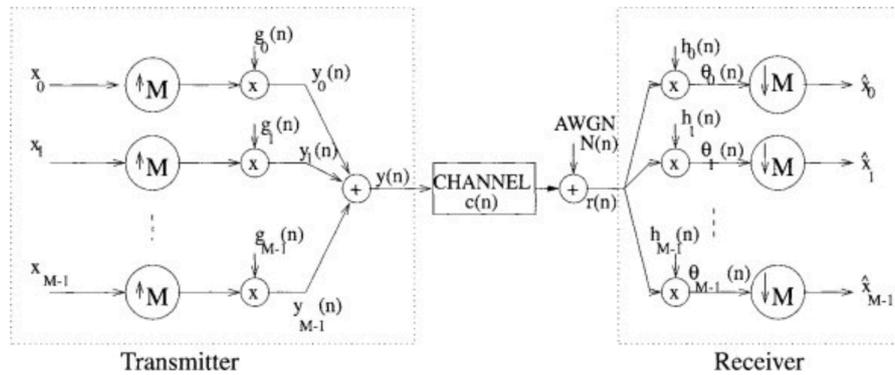


Figura 2.7. Esquema transmisor y receptor DMT

Se aprecia que cada flujo de datos se multiplica por una función de análisis distinta ( $g_n$ ). De esta forma, cada flujo de datos se modula con una frecuencia diferente, es decir, con diferentes subportadoras. En recepción se usan las funciones de síntesis correspondientes para la demodulación de la señal. La división del espectro en diferentes subbandas supone un ligero aumento en la complejidad del sistema pero que permite la adaptación a la respuesta frecuencial del mismo pudiéndose llegar a obtener tasas de transmisión mayores.

Este formato permite por lo tanto modular cada portadora con un formato diferente de las demás. En el caso de emplear QAM cada una de las subportadoras pueden tener órdenes de modulación diferentes. Esto quiere decir que en las bandas en las que la relación señal a ruido sea mayor se podrá emplear un formato de modulación con mayor número de niveles. Esta técnica se conoce como **bit loading** (BL) y permite el mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible. En la Figura 2.8 se muestra el estado del arte en cuanto a tasas logradas empleando DMT. En naranja se muestran los resultados obtenidos con fibras GI-POF [19], en verde los obtenidos con fibras Multicore POF [20], los obtenidos con SI-POF en azul [13],[16],[18],[21],[22] y en rojo la GI-POF perfluorinada (PF GI-POF) [17].

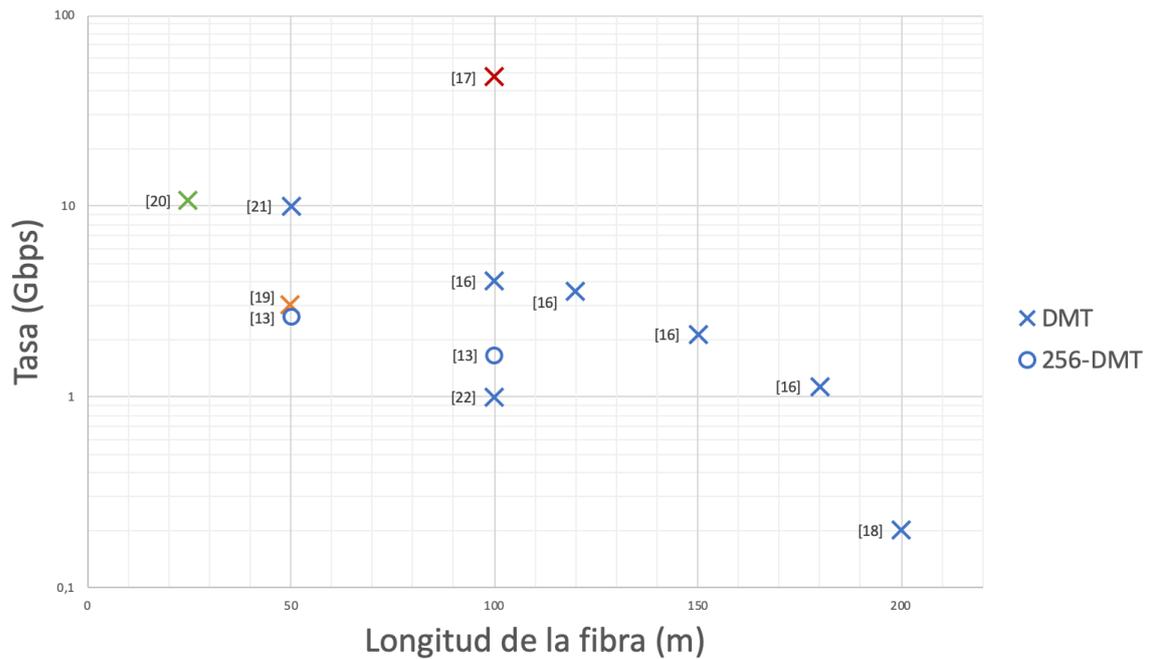


Figura 2.8. Estado del arte tasas DMT

Como se puede observar, la fibra GI-POF perfluorinada permite aumentar drásticamente el producto distancia-ancho de banda del enlace POF, llegando a tasas de transmisión de 47.4 Gbps sobre 100 metros de fibra [17]. Sin embargo estas buenas prestaciones son a causa de las propiedades físicas de la fibra que, tal y como se ha explicado en el apartado 2.2 presenta otras desventajas respecto a las fibras POF estándar. Es de reseñar los resultados obtenidos en [18], llegando a lograr transmitir sobre 200 metros de SI-POF mediante la fabricación de componentes específicos para transmisor y receptor. En la mayoría de trabajos se especifica la aplicación de algún algoritmo de *bit loading*. En general, se puede concluir que las tasas alcanzables varían entre 1 y 5 Gbps siendo las longitudes de las fibras de entre 50 y 180 metros, siempre dependiendo de la configuración particular de los componentes activos del enlace.

### 2.4.3. CARRIERLESS AMPLITUDE AND PHASE MODULATION (CAP)

La modulación CAP (*Carrierless Amplitude and Phase Modulation*) consiste en una modulación QAM empleando una única portadora de baja frecuencia, es decir, a diferencia de DMT transmitiendo en una única banda. Como vemos en la Figura 2.9, en el transmisor se genera un flujo de datos en serie basado en un generador de secuencias pseudoaleatorias (PRBS – *PseudoRandom Binary Sequence*). Esta secuencia se codifica y mapea de acuerdo a una constelación determinada (M-QAM). Estos símbolos son sobremuestreados para igualar la frecuencia de muestreo de los filtros conformadores.

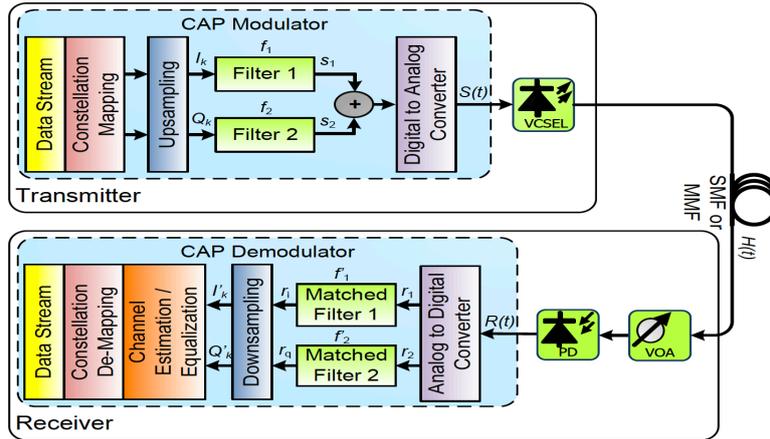


Figura 2.9. Esquema funcionamiento CAP [23]

Las componentes en fase y cuadratura obtenidas de la secuencia sobremuestreada se filtran con los filtros conformadores digitales, diseñados específicamente para lograr una forma de onda de SRRC (*square-root raised cosine*). Estos filtros son ortogonales entre si y su respuesta temporal es la mostrada en la Ecuación 2.1 y en la Figura 2.10.

$$f_1(t) = g_{SRRC}(t) \cos 2\pi f_c t$$

$$f_2(t) = g_{SRRC}(t) \sin 2\pi f_c t$$

Ecuación 2.1. Respuesta temporal filtros conformadores CAP

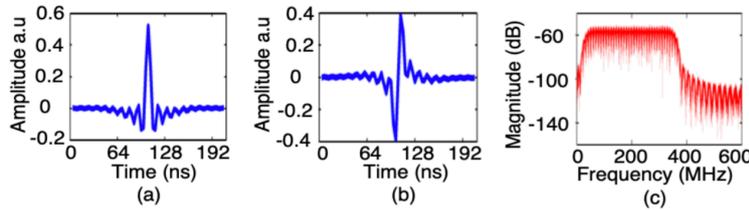


Figura 2.10. (a) Respuesta impulsional filtro 1,  $f_1$  (b) Respuesta impulsional filtro 2,  $f_2$  (c) Respuesta frecuencial [23]

El espectro en transmisión de la Figura 2.10(c) muestra cómo se transmite una única banda. En recepción, se dispone de filtros adaptados a los filtros ortogonales usados en transmisión. Estos filtros recuperan ambas dimensiones de la secuencia original de símbolos. El uso de CAP supone un aumento en la complejidad tanto en la generación de la señal a transmitir como en el posterior procesamiento de la señal recibida con respecto a PAM. En las medidas realizadas en este trabajo se comprueba si ese aumento de la complejidad del sistema reporta algún beneficio en las prestaciones del sistema.

Una ampliación de CAP es el empleo de más de dos filtros adaptados y ortogonales entre sí tras el sobremuestreo. En la práctica el número de dimensiones se suele corresponder con el número de usuarios o servicios. Esta técnica recibe el nombre de *High Dimensionality CAP* y supone un aumento en el ancho de banda ocupado. En la Figura 2.11 se muestran las tasas alcanzadas empleando CAP como formato de modulación [6],[13],[17],[18],[24],[28].

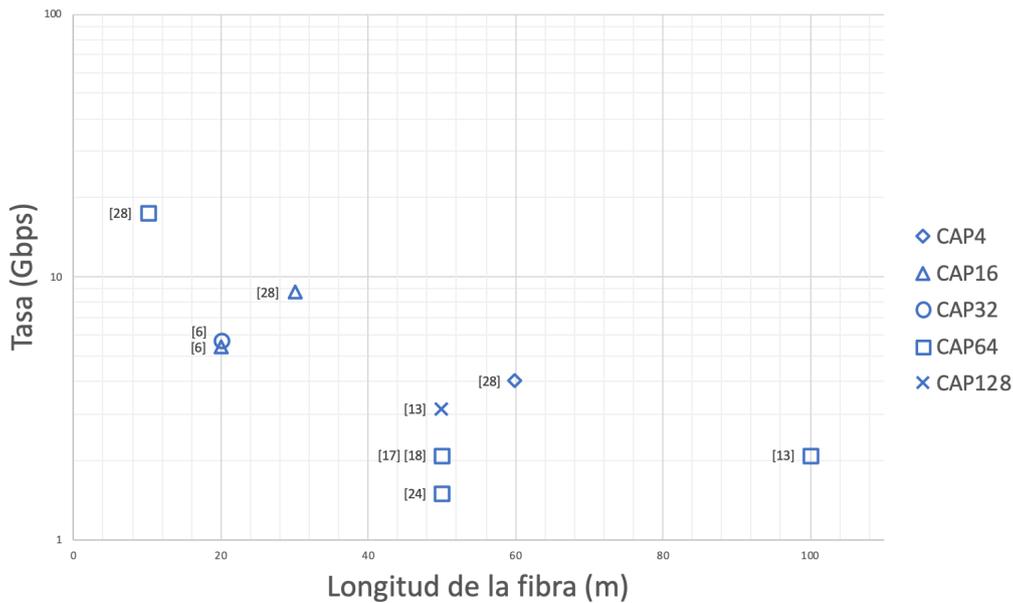


Figura 2.11. Estado del arte tasas CAP

Analizando los resultados publicados, se observa que en [24] se alcanzó un tasa de 1.5 Gbps con CAP64 en una fibra SI-POF de 50 metros. Estos resultados fueron superados en los trabajos [17] y [18], en los que se consiguió una tasa de 2.1 Gbps en una fibra de 50 metros SI-POF empleando la misma modulación CAP64, aunque es cierto que estos resultados se pudieron obtener mediante la introducción de técnicas de corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*) a diferencia del primero. Además en este estudio se obtuvieron mejores resultados con CAP64 que con OFDM. En [6] se alcanzaron tasas superiores (5.4 y 5.7 Gbps) a costa de reducir la longitud de la SI-POF a 20 metros empleando CAP16 y CAP32, respectivamente. Más recientemente, en [28] se añadió al empleo de CAP el uso de un ecualizador complejo SC-MLP (*Split-complex multilayer perceptron*), llegándose a alcanzar tasas de 17.5 Gbps (CAP64), 8.7 Gbps (CAP16) y 4 Gbps (CAP4) en fibras SI-POF de longitudes de 10, 30 y 60 metros respectivamente. En [13] se realizaron experimentos con longitudes mayores, llegando a transmitir sobre 100 metros de SI-POF tasas de 2.1 Gbps empleando el formato de modulación CAP64.

#### 2.4.4. MULTIBAND CAP

La modulación CAP multibanda o MultiCAP (*Multiband CAP*) supone una evolución respecto a CAP en la que la señal es dividida en subbandas independientes, como vemos en la Figura 2.12. De un modo similar a como ocurre con DMT, la secuencia de bits inicial es dividida en N secuencias diferentes a cada una de las cuales se les aplica un par de filtros conformadores distintos. De este modo se obtiene un espectro en frecuencia como el mostrado en la Figura 2.13 (ejemplo para 4 subbandas).

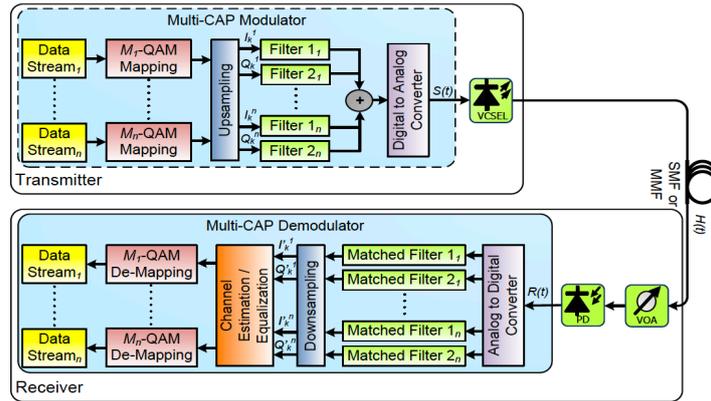


Figura 2.12. Esquema funcionamiento MultiCAP [23]

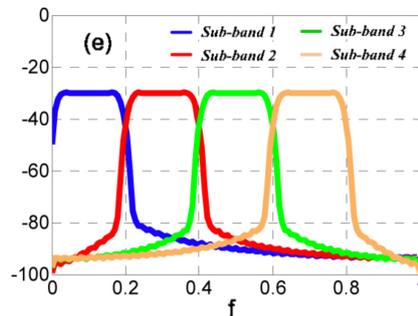


Figura 2.13. Espectro de la señal MultiCAP

Así, la potencia de señal y orden de modulación pueden asignarse independientemente a cada banda dependiendo de su SNR, aumentando así la flexibilidad del rendimiento con respecto a CAP. Esto quiere decir, que este formato de modulación admite también técnicas de *bit loading* al igual que DMT o cualquier otra técnica de modulación que divida el espectro en subbandas. Se espera que el uso de varias portadoras permita alcanzar tasas mayores que con NRZ binario, PAM o CAP. Este formato de modulación todavía no se ha aplicado a sistemas de transmisión con fibra óptica de plástico. En este trabajo se implementará este formato con el fin de aumentar la tasa de transmisión, gracias al mayor aprovechamiento del ancho de banda que introduce esta técnica de modulación.

#### 2.4.5. ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM)

Como ocurría con DMT y MultiCAP, OFDM es otra técnica que emplea múltiples portadoras para la transmisión de una señal digital. El término '*orthogonal*' atiende a que las portadoras deben ser ortogonales entre sí de modo que no haya interferencia entre ellas, sin que sea necesario establecer bandas de guarda entre las portadoras. De este modo no es necesario que exista un filtro para cada portadora (como ocurre con DMT o MultiCAP), simplificando los transmisores y receptores. Para que exista esta ortogonalidad entre las portadoras es necesario que el espaciado de las portadoras sea  $k/T_u$  siendo  $T_u$  el tiempo útil de duración del símbolo y  $k$  un entero positivo. Así, la frecuencia de cada portadora tendrá  $k$  ciclos más por periodo de símbolo que la portadora anterior. Para  $N$  portadoras el ancho de banda total será:  $N \cdot k/T_u$ .

En la Figura 2.14 y Figura 2.15 vemos los esquemas en transmisión y recepción para este tipo de modulación. Cada una de las portadoras es modulada empleando un formato de modulación; normalmente se emplea QAM o PSK. La manera más comúnmente usada de implementar la ortogonalidad entre las portadoras es empleando la transformada inversa de Fourier (IFFT) tras el mapeo de los símbolos, obteniendo una serie de muestras complejas en el dominio del tiempo que son posteriormente mezcladas en cuadratura. En el receptor se lleva cabo el proceso inverso.

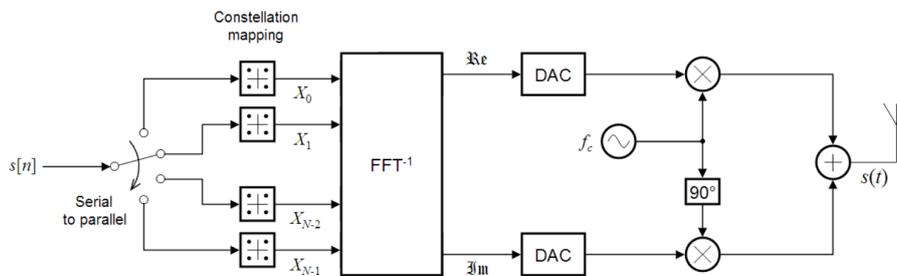


Figura 2.14. Esquema funcionamiento transmisor OFDM

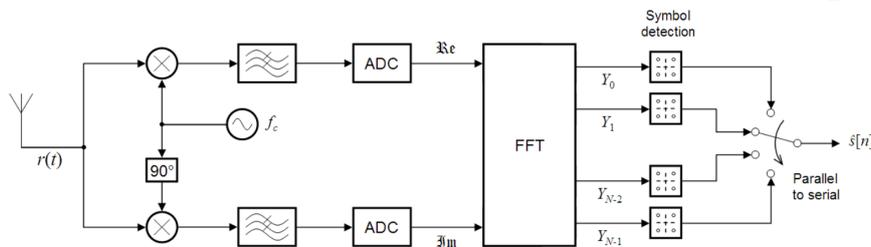


Figura 2.15. Esquema funcionamiento receptor OFDM

La ortogonalidad tiene la ventaja de una elevada eficiencia espectral. Sin embargo, este tipo de modulación requiere una completa sincronización entre emisor y receptor. Si la ortogonalidad de las portadoras se pierde, aparece la interferencia entre las portadoras ICI (Inter-Carrier Interference). La forma más común de llevar a cabo la sincronización entre transmisor y receptor es empleando un prefijo cíclico (CP) que se transmite en unos intervalos de guarda que deben incorporarse a la transmisión. La principal desventaja del uso del prefijo cíclico (CP) es que la eficiencia espectral se ve reducida dado que el CP son símbolos repetidos y que por tanto no llevan información útil.

En cuanto a la aplicación del OFDM en POF se realizó un primer estudio [30] del uso de OFDM en fibras de plástico en el que se obtuvieron unos primeros resultados de las tasas alcanzables así como eficiencias espectrales. Concretamente, para SI-POF estándar (núcleo de PMMA de 1 mm de diámetro), se obtuvieron tasas de transmisión de más de 1 Gbps con eficiencias espectrales superiores a 3 bits/s/Hz. En este estudio se emplearon también técnicas de *bit loading* para una mayor adaptación a las características espectrales del sistema de transmisión. En el siguiente apartado se exponen las características de estos algoritmos.

## 2.4.6. VENTAJAS DE LA DIVISIÓN EN BANDAS DEL ESPECTRO

Un aspecto que considero importante a tratar antes de pasar a las explicaciones relativas a la metodología empleada es el de cuál es el beneficio, a priori, de dividir el espectro frecuencial de transmisión en diferentes bandas, tal y como se hace en DMT, MultiCAP y OFDM. Como bien se ha explicado, la característica más destacable e indeseable de las fibras de plástico (especialmente las de salto de índice) es su elevada dispersión modal que hace que la respuesta frecuencial de estas fibras caiga rápidamente conforme aumenta la frecuencia. Dividir dicho ancho de banda en diferentes bandas nos permite transmitir en cada banda con una modulación u otra en función del nivel de señal en dicha banda, ajustándonos de este modo mucho más a la forma del espectro de nuestro sistema de transmisión. De este modo lo que se pretende es ajustar el espectro de transmisión lo más posible a la respuesta en frecuencia de las fibras que empleemos. En realidad, con estas técnicas no solo nos ajustamos mejor a las características frecuenciales de la fibra sino a las del sistema de transmisión completo.

Las técnicas empleadas para realizar esta optimización se pueden basar en diferentes métodos como son: el *water pouring*, *uniform power loading* [30], el algoritmo de Levin-Campello [31] o el algoritmo de Chow [32]. Estas técnicas de *bit loading* (BL), que asignan a cada banda diferente número de bits, pueden ampliarse con la reasignación de la potencia con que se transmite cada banda mediante algoritmos de ajuste de potencia de cada banda o *power loading* (PL), con el fin de adaptarse más aún a las características espectrales del sistema.

En este trabajo se ha desarrollado un algoritmo conjunto de *bit y power loading* (basado en el algoritmo de Levin-Campello) que será explicado más adelante. A continuación se presentan resumidamente las ventajas y desventajas del uso de este tipo de algoritmos:

Ventajas algoritmo de *bit y power loading*:

- Máximo aprovechamiento del ancho de banda existente
- Adaptación a las características espectrales del sistema de transmisión
- Aumento real de la tasa de transmisión en bits por segundo
- Aumento de la eficiencia espectral en bits/s/Hz

Desventajas algoritmo de *bit y power loading*:

- Aumento de la complejidad del sistema
- Pérdida de rendimiento en términos de tiempo de ejecución en el funcionamiento del sistema
- Tiempo de ejecución proporcional al número de bandas en las que se divide el espectro

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se van a describir los procedimientos empleados para la realización de las medidas de laboratorio y la obtención de resultados para los distintos formatos de modulación. El enfoque adoptado para el trabajo ha sido realizar medidas mediante el montaje experimental de un enlace POF y emplear Matlab tanto en el transmisor para la generación de la señal adecuada según el formato que corresponda, como en el receptor para el procesado de la señal recibida. Lo primero es seleccionar los componentes del sistema de transmisión con el que se van a realizar dichas medidas. Después se describirá el funcionamiento de los códigos que se han empleado para implementar las diferentes técnicas de modulación.

#### 3.1. MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental del enlace basado en POF que se ha empleado en este trabajo se compone de dos partes: la parte óptica y la parte electrónica. En la Figura 3.1 se muestra un esquema básico conceptual del sistema. En azul encontramos los componentes que trabajan en el dominio eléctrico y en rojo los que trabajan en el dominio óptico.

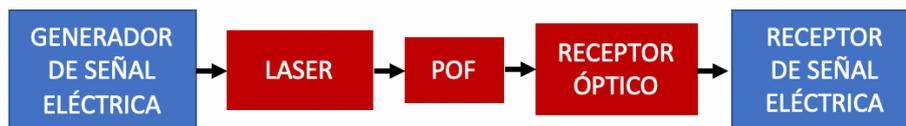


Figura 3.1. Esquema básico del montaje

Previamente a la explicación del montaje, hay que mencionar que se ha empleado un analizador de redes vectorial (VNA – *Vector Network Analyzer*) para la caracterización de los diferentes dispositivos que se van a integrar en el sistema de transmisión tal y como se muestra en la Figura 3.2.

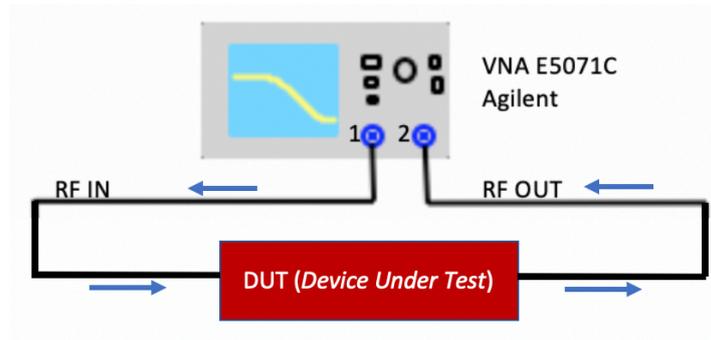


Figura 3.2. Esquema caracterización de dispositivos

En nuestro caso el parámetro que nos interesa de los que nos muestra el VNA es el  $S_{21}$ , que es el que establece la relación entre la señal que entra al sistema y la que sale del mismo. El analizador empleado es el modelo E5071C de Agilent. Abarca un rango de frecuencias de 9 kHz a 4.5 GHz con un amplio rango dinámico de 130 dB y una velocidad de medida de 8 ms.

### 3.1.1. PARTE ÓPTICA

La parte óptica se compone de tres elementos: el emisor (en nuestro caso el láser L658P040 de ThorLabs), la fibra óptica de plástico (POF), y el receptor (Graviton SPD-2). En este apartado se explican todos los aspectos relativos a estos tres dispositivos que van a ser determinantes en las medidas experimentales a realizar más adelante.

#### 3.1.1.1. Emisor

Nuestro emisor, que se trata de un diodo láser (L658P040 de ThorLabs), irá montado en una base (LDM9T/M de ThorLabs) que es alimentada con un controlador de corriente (Laser Diode Combi Controller ITC502 de ThorLabs). El láser empleado se caracteriza por una potencia de emisión según especificaciones de 40 mW, que se deberá tener en cuenta en la toma de medidas dado que se podría saturar el receptor si le llegara demasiada potencia. Su corriente mínima de alimentación es de 35 mA (corriente umbral) y la máxima es de 110 mA. El valor de corriente de alimentación recomendado es de entorno a 75mA. En la Figura 3.3 se muestra la relación entre la potencia óptica que emite el laser y la corriente de alimentación. Como se aprecia la potencia de salida del láser en el punto de operación (75 mA) es de aproximadamente 8.5 mW lo que es significativamente menor que el valor indicado por el fabricante. Parte de esta discrepancia puede estar relacionada con las pérdidas de acoplo a la POF. En cualquier caso, las medidas de potencia representadas son las que realmente podemos entregar a un detector de un enlace POF que use esta fuente.

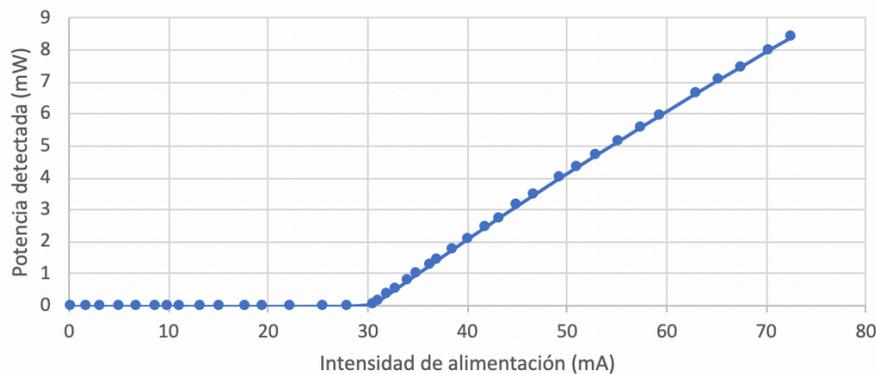


Figura 3.3. Curva de funcionamiento del laser L658P040

El uso de la base para el láser se hace casi obligado por la necesidad del control de temperatura del láser que incluye esta base, así como para la correcta conexión con la fibra que debe estar alineada con el láser. La base se caracteriza por una respuesta frecuencial que cae ligeramente con el aumento de la frecuencia y con un nulo en torno a 750 MHz. En la Figura 3.4 se muestra el espectro obtenido con el VNA empleando el mismo receptor en ambos casos (Graviton SPD-2) y empleando el láser con la base y un transceptor óptico de Firecomms como emisores. La diferencia entre ambos montajes para las medidas de los dos espectros es solo el emisor. Se pretende mostrar esa respuesta indeseada de la base en torno a 750 MHz.

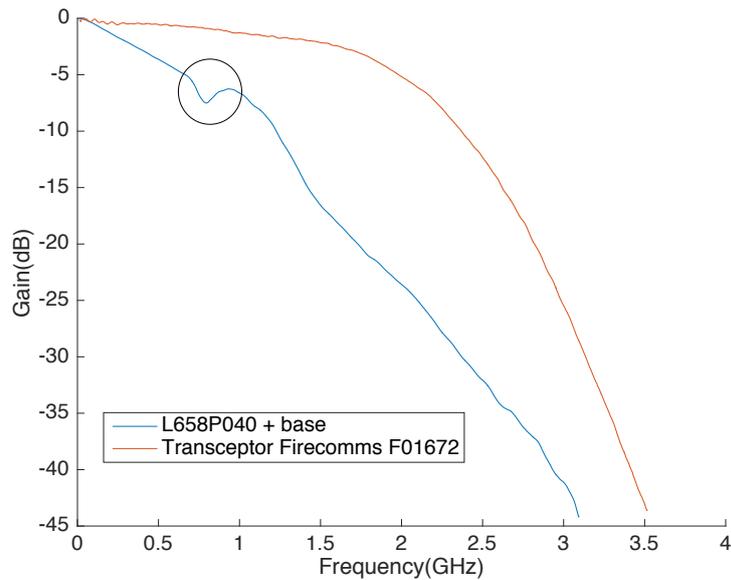


Figura 3.4. Espectro obtenido con el VNA con el Graviton SPD-2 como receptor y dos emisores distintos

### 3.1.1.2. Receptor

Emplearemos el dispositivo Graviton SPD-2. Este receptor se caracteriza por una elevada sensibilidad y una respuesta frecuencial plana en un rango muy amplio de frecuencias, lo que permite medir señales de hasta pocos GHz. En la Figura 3.5 se muestra su respuesta frecuencial proporcionada por los fabricantes. Se puede ver que el ancho de banda a 3 dB es de aproximadamente 1.5 GHz y que en 3 GHz hay una caída de unos 22 dB.

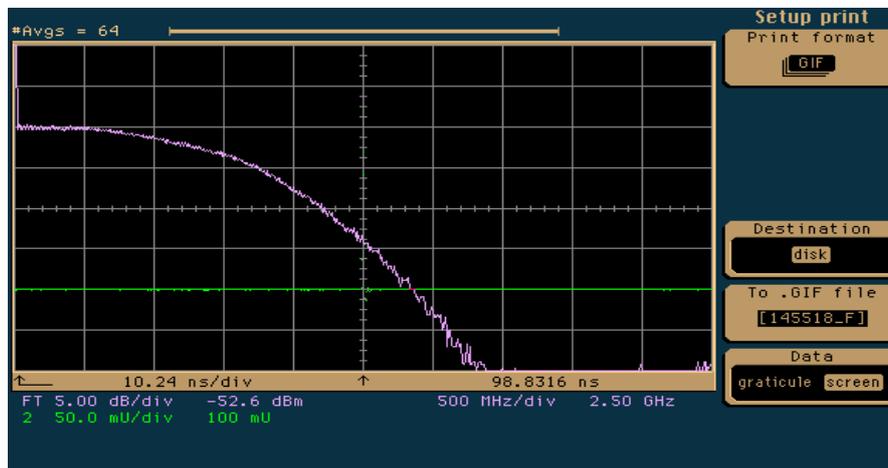


Figura 3.5. Respuesta frecuencial del Graviton SPD-2

### 3.1.1.3. Fibra óptica de plástico (POF)

Se conecta empleando conectores ST (ver Figura 3.6) tanto al emisor (base) como al receptor (Graviton). Emplearemos diferentes tipos de fibra óptica para compararlas entre sí y analizar sus ventajas y desventajas. Principalmente emplearemos cuatro tipos de fibra.



Figura 3.6. Conector ST

- Fibra SI-POF MH4001 ESKA de Mitsubishi. Como fibra de salto de índice, se caracteriza por una dispersión modal elevada que hace que la respuesta frecuencial presente bajos anchos de banda. Esta fibra tiene una apertura numérica (NA) más reducida (0.3) que la SI-POF GH (más común) lo que en principio debería implicar una menor dispersión modal. Su atenuación medida en laboratorio es de 0.084 dB/m.
- Fibra SI-POF GH4001 ESKA de Mitsubishi. Sus características son similares a la fibra MH teniendo esta una apertura numérica de 0.5. En cuanto a atenuación, ambas fibras tienen valores parecidos. Su atenuación medida en el laboratorio es de 0.07 dB/m.
- Fibra GI-POF OM-GIGA SE100 de Optimedia. Esta fibra de índice gradual presenta una dispersión modal mucho menor teniendo así una respuesta frecuencial mucho más plana en frecuencia. Por el contrario, la atenuación de esta fibra es mucho mayor que la de las dos anteriores. Su atenuación medida en el laboratorio es de 0.218 dB/m, que como se ha explicado en el apartado 2, es mayor que la de las fibras SI-POF.
- Fibra Multicore SMCK de Asahi Kasei. Como se ha explicado en el apartado de fundamentos teóricos esta fibra tiene varios núcleos y esto supone una gran dependencia con la forma con la que entra la luz en la fibra como se muestra más adelante. Su atenuación medida en el laboratorio es de 0.186 dB/m.

Para la caracterización de estas fibras de plástico se ha empleado también el VNA. Se ha realizado la medida del sistema completo con la fibra a caracterizar (transmisor-fibra-receptor) y se ha tomado una medida de referencia con un tramo muy corto de fibra (transmisor-rabillo-receptor), que únicamente contendrá el efecto de transmisor y receptor. De esta forma, restando las dos medidas es posible obtener la respuesta frecuencial propia de la fibra separadamente del resto del sistema de transmisión. Además dado que con el rabillo la potencia óptica que llega al detector es excesiva (no debe ser mayor a -4dBm según especificaciones) se ha empleado un atenuador óptico. Este atenuador no cambia la respuesta frecuencial por lo que es equivalente a un rabillo de fibra pero con más atenuación. El montaje con el VNA que se ha preparado para esta caracterización se muestra en la Figura 3.7.

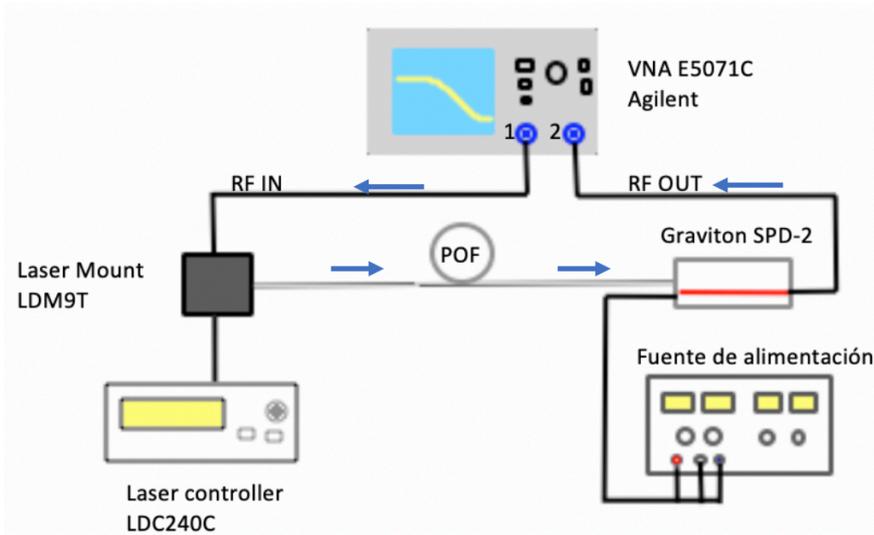


Figura 3.7. Montaje para las medidas de caracterización de las fibras ópticas de plástico

A continuación se muestran los resultados obtenidos (Figura 3.8) con el VNA una vez restada la medida de referencia (raballo/atenuador), y que corrobora las características de las fibras explicadas anteriormente. Además se ha realizado una normalización al máximo valor del espectro para facilitar la comparación de las fibras.

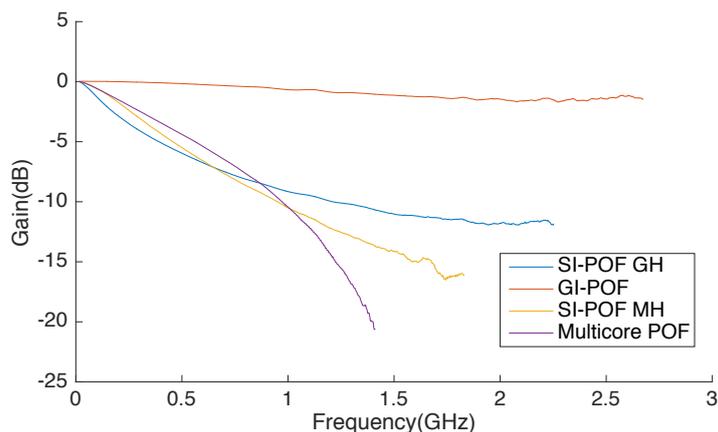


Figura 3.8. Respuesta frecuencial de las POFs medidas con el VNA

Se puede observar que la fibra de gradiente de índice tiene una respuesta muy plana en frecuencia lo que puede ser muy beneficioso en la transmisión, aunque también dependerá de la potencia recibida dado que tiene más atenuación que las demás. Además se puede ver que esta fibra tiene el mayor ancho de banda, llegando hasta casi los 3 GHz. Los anchos de banda a 3 dB del resto de fibras son similares, del orden de 250 a 400 MHz. Sin embargo, la forma de la respuesta frecuencial es distinta, sobre todo si comparamos la MC-POF con las SI-POF, lo que hace que la respuesta sea medible hasta aproximadamente 2 GHz para la GH, 1.75 GHz para la MH y sólo 1.4 GHz para la Multicore. Las dos fibras de salto de índice presentan respuestas frecuenciales similares siendo la MH algo mejor en bajas frecuencias y la GH mejor a partir los 600 – 700 MHz.

Si bien las respuestas frecuenciales aparecen normalizadas en la Figura 3.8, las medidas sin normalizar revelan las características de atenuación de las fibras (ver Anexo II). A este respecto, la fibra GH es la que menor atenuación presenta, mientras que la fibra GI-POF es la que tiene mayores pérdidas. En cuanto a la fibra MH, ésta presenta peores

características de atenuación de las esperadas, presentado valores mayores que los de la GH.

Además, se ha observado que la forma del espectro de la fibra Multicore varía mucho en función de las condiciones de inyección (colocación de la fibra). En la Figura 3.9 se muestran distintas medidas tomadas con el mismo montaje para esta fibra. La diferencia entre las tres medidas es la colocación de la fibra en la base, que se fue girando ligeramente entre medidas (modificando las condiciones de inyección). Se observa esa dependencia entre la forma del parámetro  $S_{21}$  y la posición de la fibra, es decir, cómo entra la luz en ella. Dependiendo de la cantidad de luz que entre en cada uno de los núcleos se obtienen resultados ligeramente diferentes, pero que pueden alterar el funcionamiento de nuestro sistema. Como vemos aparece según su colocación un nulo en torno a 1.5 GHz. Este comportamiento es completamente indeseado porque, como veremos, hay casos en los que las medidas experimentales toman muchas transmisiones de tramas y capturas de las mismas para la optimización del sistema, y cualquier modificación en la posición de la fibra podría cambiar su comportamiento durante la toma de medidas.

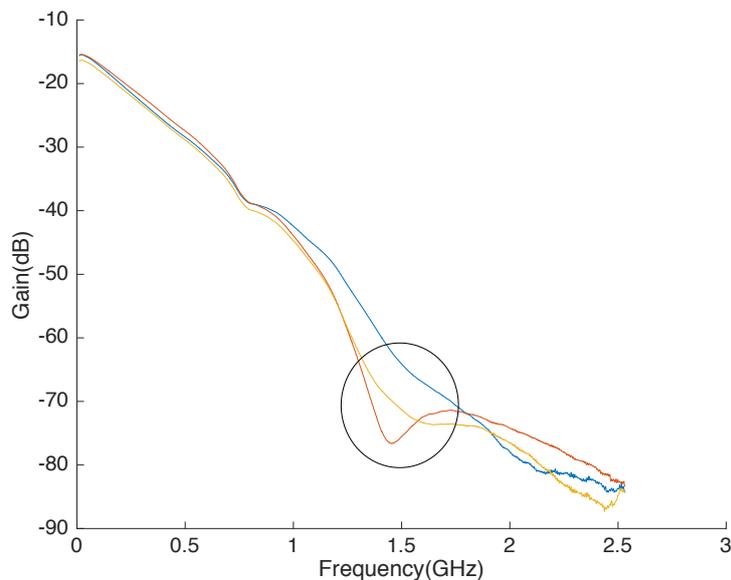


Figura 3.9. Variación espectro de la fibra Multicore según la posición de la fibra (inyección de la luz)

### 3.1.2. PARTE ELECTRÓNICA

La parte electrónica incluye un generador de formas de onda, un osciloscopio, un amplificador de RF y los cables de RF necesarios para unir estos elementos.

#### 3.1.2.1. AWG (Arbitrary Waveform Generator)

En el extremo transmisor se ha empleado un generador de formas de onda (AWG – *Arbitrary Waveform Generator*) para crear las señales a transmitir por el enlace POF según los distintos tipos de modulación. Se trata del equipo M8195A de Keysight. El AWG estará conectado a un ordenador mediante un cable Ethernet para su control.

### 3.1.2.2. Osciloscopio

En el extremo receptor se ha empleado un osciloscopio de alta tasa de muestreo (DSO – *Digital Storage Oscilloscope*) para la visualización y captura de la señal recibida, que será procesada *offline*. Se trata del equipo DPO7254 de Tektronix con una tasa de muestreo máxima de 40 Gsamples/s. Deberá estar conectado al AWG para la sincronización de los relojes de ambos dispositivos. El osciloscopio también estará conectado a un ordenador mediante un cable Ethernet para su control.

### 3.1.2.3. Amplificador

Se trata de un amplificador de la señal eléctrica previo al emisor óptico. La elección de un amplificador u otro es determinante dado que puede suponer un cambio grande en la respuesta frecuencial del sistema completo y por lo tanto de las tasas de transmisión que se puedan llegar a lograr en las medidas a realizar. Se diaponía de cinco amplificadores posibles que debían ser comparados para la elección del más apropiado. Además de comprobar sus hojas de características para comparar sus respuestas frecuenciales, ganancias y figuras de ruido, se ha llevado a cabo una caracterización de los amplificadores tanto por si solos, como con el emisor y receptor unidos por el atenuador, como con el sistema completo con las 4 fibras de 50 metros. Para estas caracterizaciones se ha empleado también el VNA con el montaje de la Figura 3.7 añadiendo el amplificador antes de la base del láser para las medidas del sistema completo. Para la primera medida de los amplificadores individualmente simplemente se han conectado sus entradas y salidas a los dos puertos del VNA.

En la Figura 3.10 se muestran las respuestas frecuenciales medidas con el VNA de los cinco amplificadores.

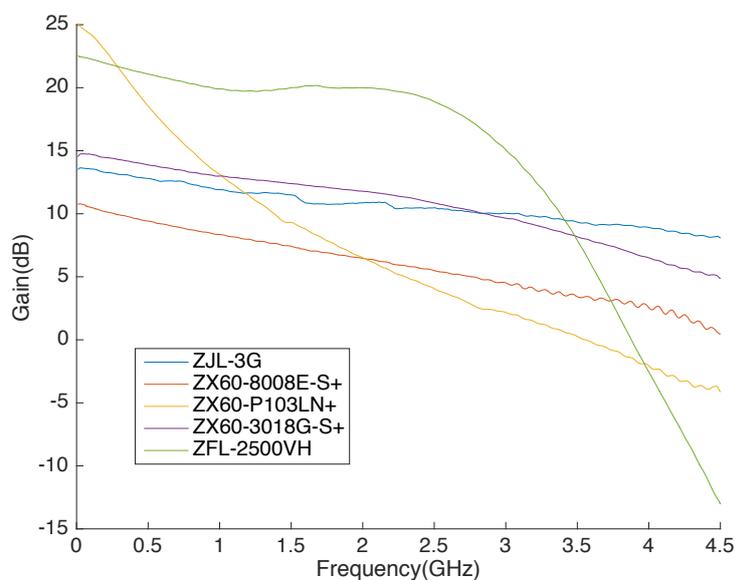


Figura 3.10. Respuestas frecuenciales de los amplificadores de RF medidas con el VNA

Como vemos la ganancia de amplificadores ZX60-P103LN+ y ZFL-2500VH es sustancialmente mayor a la de los demás, siendo la del ZFL-2500VH más plana en frecuencia que la del ZX60-P103LN+. A continuación (Figura 3.11), vamos a ver como

resulta la combinación de los amplificadores con el emisor y receptor, empleando, de momento, un rabillo (o atenuador para asegurar no exceder la máxima potencia que puede llegar al receptor).

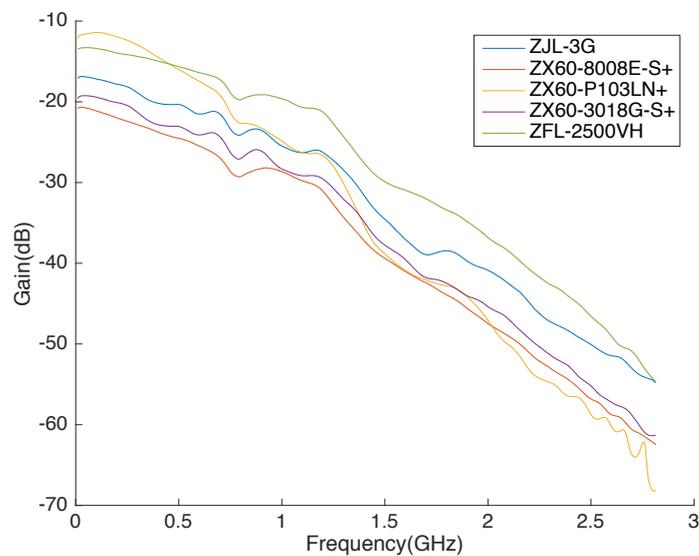


Figura 3.11. Respuesta frecuencial del sistema amplificador-transmisor-rabillo-receptor

Como vemos el ZFL-2500VH parece ser el que mejor funciona en combinación con nuestro emisor y receptor, dado que aunque el ZX60-P103LN+ es mejor para bajas frecuencias presenta una caída mucho más rápida a partir de 500MHz. Por ello la decisión final es escoger el ZFL-2500VH. En el Anexo III se amplían las razones de esta elección con una comparación de los amplificadores en conjunto con las diferentes fibras de plástico.

#### 3.1.2.4. Fuentes de alimentación

Se necesitan dos fuentes de alimentación: para el receptor y para el amplificador.

- El Graviton SPD-2 alimentado a +-15V y tierra con el cable especial para dicho dispositivo. Fuente: Agilent E3647A
- El amplificador debe estar alimentado con +15V y tierra. Fuente: Freak M10-TP-305C.

Para resumir este apartado de descripción del enlace óptico empleado en las medidas de laboratorio, se muestra el siguiente esquemático del montaje completo (Figura 3.12). Los cables azules son cables de RF, los negros cables alimentación, los naranjas cables ethernet, el violeta un cable coaxial para sincronización de los relojes y la línea gris es la fibra óptica de plástico.

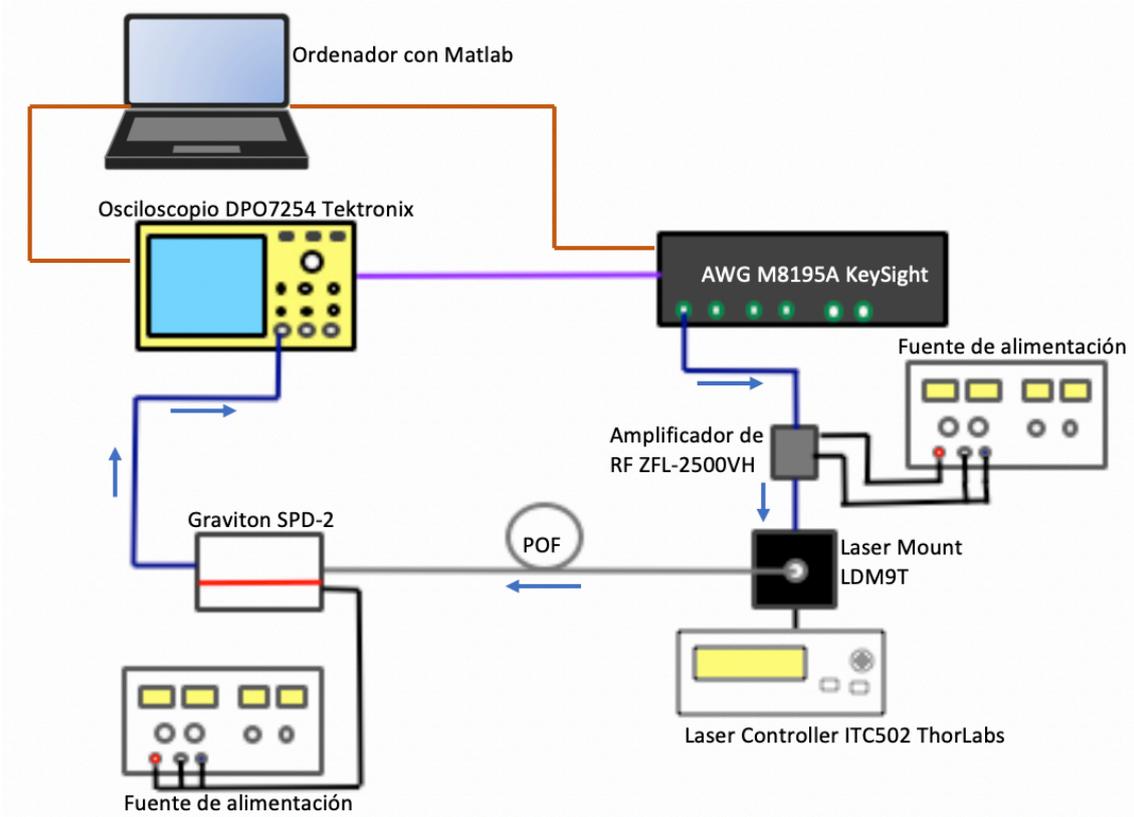


Figura 3.12. Esquema del setup completo para realización de las medidas

### 3.2. ALGORITMO DE *BIT* Y *POWER LOADING*

Al tratar de ajustarse al máximo a la respuesta frecuencial del sistema con el que se está trabajando con la división en bandas, se puede llegar un paso más lejos con algoritmos que optimizan más el sistema con el aprovechamiento de la potencia disponible en transmisión. En este caso el algoritmo que se ha aplicado al sistema es uno basado en el de Levin-Campello que, además de llevar a cabo *bit loading* con la asignación de diferentes ordenes de modulación o número de bits a cada banda, posteriormente lleva a cabo un reajuste de la potencia otorgada a cada banda (*power loading*) con el objetivo de aumentar más aún la tasa de transmisión.

Como se ha dicho, el objetivo del algoritmo aplicado es el de maximización de la tasa de bits transmitida, empleando dos técnicas que se aplican de forma conjunta: *bit loading* y *power loading*. Este algoritmo emplea el parámetro de medida de calidad EVM (Error Vector Magnitude) para la asignación de bits a cada banda. El EVM es una medida del error en la señal recibida que se calcula comparando la constelación recibida con la teórica que debería haberse recibido. Según la Figura 3.13 que se muestra a continuación el EVM se define como se indica en Ecuación 3.1.

$$\text{EVM}(\%) = \sqrt{\frac{P_{\text{error}}}{P_{\text{reference}}}} \times 100\%$$

Ecuación 3.1

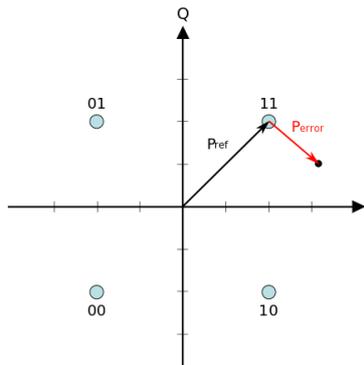


Figura 3.13. Definición del EVM según la desviación del símbolo recibido respecto al símbolo teórico

El algoritmo conjunto de *bit/power loading* introducido en este trabajo opera como se describe a continuación. Primeramente se transmite en cada banda una señal empleando QPSK con el objetivo de llevar a cabo una primera estimación de la calidad de cada banda y del número de bits máximo (constelación de mayor tamaño) que se puede transmitir en cada banda. Tras la transmisión y recepción de la señal se calcula el EVM para cada banda y empleando unos umbrales previamente establecidos se decide que constelación se va a transmitir en cada banda. Este proceso recibe el nombre de *bit loading* por la asignación a cada banda de diferente número de bits. La selección de los umbrales de EVM se realiza para asegurar un BER mínimo en recepción de  $3.8 \cdot 10^{-3}$  que asegure que posteriormente el algoritmo FEC (*Forward Error Correction*) pueda reducir dicha tasa de errores a tasas del orden de  $10^{-16}$ . En la Figura 3.14 se muestran los umbrales para cada nivel de modulación.

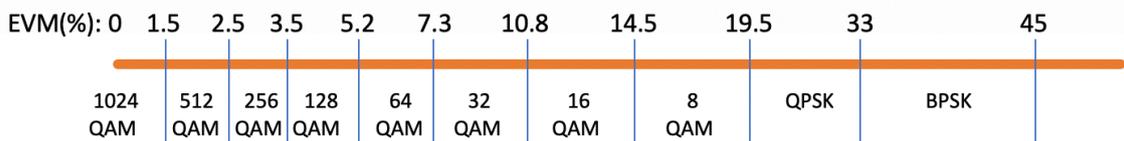


Figura 3.14. Umbrales de EVM para la asignación de las constelaciones

Antes de pasar a la reasignación de la potencia total en las diferentes bandas se deben apagar las bandas que presenten un EVM mayor al 45% dado que la calidad de esas bandas es insuficiente para transmitir la constelación más básica (BPSK). Dado que es posible que haya más de una banda con un EVM mayor al 45% estas bandas se irán apagando de una en una, tal y como se muestra en la Figura 3.15 (parte azul). Esto es así dado que al apagar una banda, la potencia de esa banda apagada se reparte entre las demás bandas, mejorando ligeramente sus EVM, y podría darse el caso que una banda que en un principio debería apagarse, al apagar otra pueda finalmente conservarse. Una vez que todas las bandas que debían ser apagadas ya se han descartado la fase inicial de *bit loading* finaliza y comienza la reasignación de potencias o *power loading* (parte roja en la Figura 3.15).

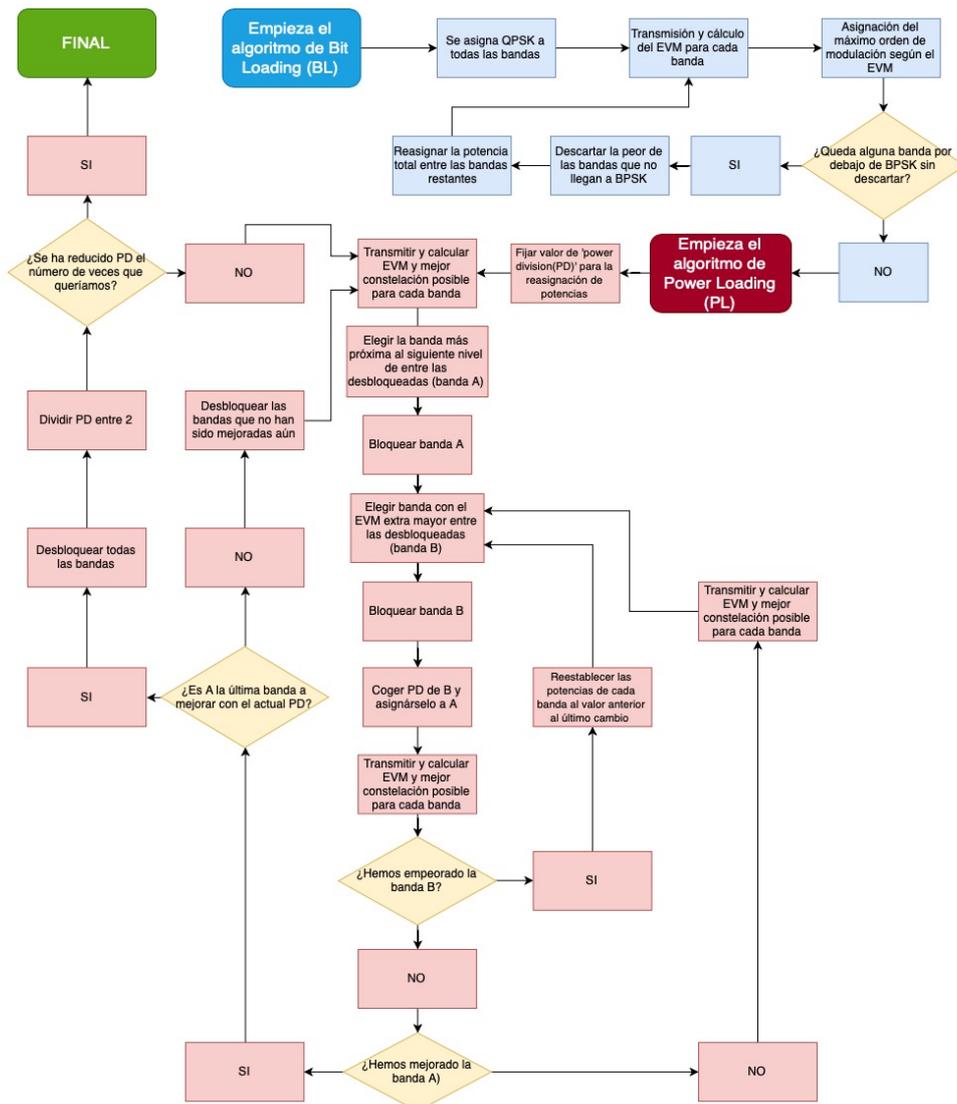


Figura 3.15. Diagrama de bloques del algoritmo de bit y power loading

Esta parte es la más larga del algoritmo de optimización y consiste en tratar de mejorar el EVM de ciertas bandas próximas al siguiente nivel otorgándoles algo más de potencia que se deberá de quitar de las demás bandas (sin bajarlas a un nivel inferior). Esta reasignación de potencias comienza localizando cual es la banda cuyo EVM está más próximo al siguiente nivel (banda A). Después se selecciona la banda (de entre las restantes) que tiene un EVM más holgado dentro de su nivel (banda B) para quitarle algo de potencia a esa banda y cedérsela a la otra. Tras esta reasignación se vuelve a transmitir la señal y se comprueba si se ha logrado mejorar la banda A, en caso positivo se avanza a tratar de subir una nueva banda, en caso negativo se pasará a quitarle potencia a la siguiente banda con EVM más holgado (cambiando la banda B), hasta que se consiga o no mejorar la banda A. Si en este proceso se quita demasiada potencia a una banda y se baja a un nivel inferior se volvería automáticamente al estado anterior.

Cuando se ha tratado de quitar potencia a todas las bandas para dársela a la banda A y no se ha conseguido mejorar, se pasa a otra banda. De este modo, se trata de mejorar todas las bandas comenzando como ya se ha dicho con las que en un principio tienen mayor probabilidad de mejora. Cuando se ha tratado de mejorar todas las bandas se

puede volver a realizar todo el proceso de un modo más preciso reduciendo el valor de potencia que se le quita a una banda y se le reasigna a otra. Así se puede realizar este proceso el número de veces que se desee, aunque normalmente más de tres veces no resulta útil porque llegado a ese punto la probabilidad de aumentar el número de bits transmitidos en una banda es muy baja y no es rentable debido al coste en términos de tiempo del algoritmo.

En el apartado de resultados, una vez se hayan medido las mejoras reales podremos analizar numéricamente los aumentos en la tasa de transmisión y en la eficiencia espectral, para después sacar conclusiones en cuanto a la rentabilidad de este algoritmo atendiendo al compromiso entre el aumento de la complejidad y la mejora de las prestaciones del sistema.

### 3.3. PROCESADO DE LA SEÑAL EN MATLAB

En este apartado se explica el proceso empleado para la generación de la señal en transmisión y el procesado de la señal recibida. Como el título del apartado indica, se ha empleado Matlab para llevar a cabo todo este procesado de señal. En los scripts empleados para cada formato de modulación se incluyen las funciones necesarias para enviar al AWG la señal a transmitir y para controlar el osciloscopio y poder capturar la señal que le llega el receptor. Estas funciones de control de equipos del laboratorio han sido proporcionadas por los integrantes del grupo de tecnologías fotónicas (GTF).

#### 3.3.1. NRZ Y PAM

En la Figura 3.16 se muestra el esquema de funcionamiento del código empleado para la transmisión de información empleando pulsos modulados en amplitud (PAM). Primeramente se genera una secuencia de bits aleatoria empleando un generador PRBS que sirve como base para la creación de los símbolos de la constelación a transmitir. En este caso se trata de constelaciones muy sencillas de solo una dimensión que se crean fácilmente con un modulador PAM proporcionado por Matlab. A continuación se lleva a cabo una replicación de cada símbolo 'Nss\_tx' veces para obtener tantas muestras por símbolo como queramos. 'Nss\_tx' depende de la frecuencia de muestreo del AWG y del ancho de banda empleado para transmitir. Tras la replicación de los símbolos estos se envían al AWG que los transmite.

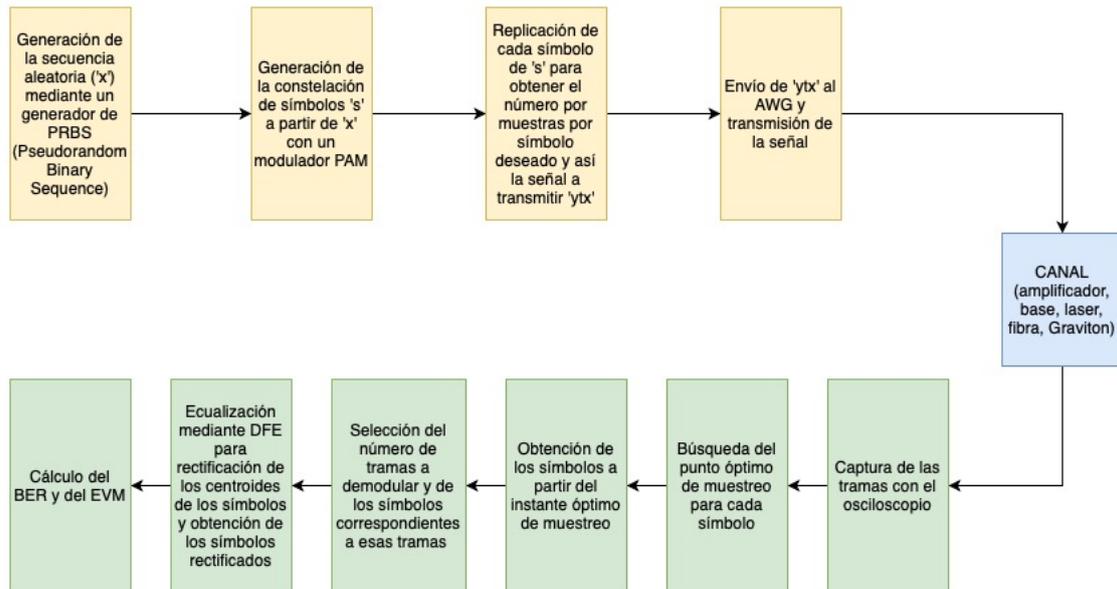


Figura 3.16. Esquema funcionamiento de modulación PAM empleado en las medidas de laboratorio

En recepción primero se debe capturar la señal detectada empleando el osciloscopio. Después se busca el instante óptimo de muestreo para cada símbolo y así se obtiene la secuencia de símbolos recibidos. Después se selecciona el número de tramas que se desean demodular. Por último se aplica una ecualización DFE (*Distributed Feedback Equalizer*) para corrección de los centroides de los símbolos recibidos y ecualización de los símbolos recibidos (ver Anexo IV). Con el cálculo del BER se comprueba si la transmisión se considera satisfactoria. Esto es, como ya se ha dicho que el BER sea menor a  $3.8 \cdot 10^{-3}$ , que es el límite para un FEC del 7%.

Para determinar la tasa máxima alcanzable con estas modulaciones se irá aumentando el ancho de banda de transmisión hasta que el BER supere el valor umbral. La tasa máxima se corresponde con dicho ancho de banda para transmisión binaria (1 bit por símbolo) y el doble del ancho de banda para 4PAM (2 bits por símbolo). La eficiencia espectral de NRZ es 1 bit/s/Hz y la de 4PAM 2 bits/s/Hz.

### 3.3.2. CAP

La Figura 3.17 muestra el funcionamiento de CAP. Este sigue el mismo patrón que las modulaciones de amplitud con la salvedad de que la modulación de los símbolos se hace empleando QAM y por tanto la constelación será bidimensional (componente de fase y componente de cuadratura). Además se deberán diseñar los filtros de CAP para el filtrado de los símbolos previo a la transmisión; y, del mismo modo, en recepción se deberá filtrar la señal recibida para la recuperación de los símbolos. El resto del sistema funciona del mismo modo que el sistema PAM.

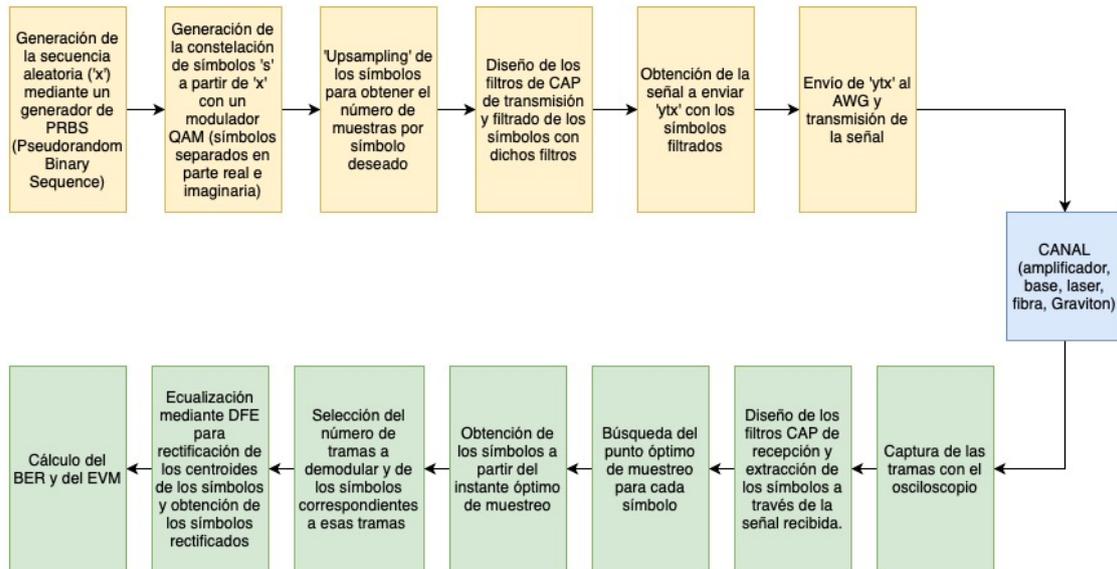


Figura 3.17. Esquema funcionamiento de CAP empleado en las medidas de laboratorio

### 3.3.3. MULTI-CAP

Como se muestra en la Figura 3.18, MultiCAP funciona también de un modo muy similar a CAP. La diferencia radica, como ya sabemos, en que ahora hay más de una banda, el espectro está dividido en varias bandas que deben ser tratadas independientemente con filtros de CAP diferentes para cada una de ellas. Además en el caso de que queramos incluir los algoritmos de optimización explicados en el apartado anterior deberemos añadir esa realimentación del sistema al esquema de funcionamiento. Por otro lado, MultiCAP exige la introducción de bandas de guarda entre las diferentes subbandas para evitar la interferencia entre ellas.

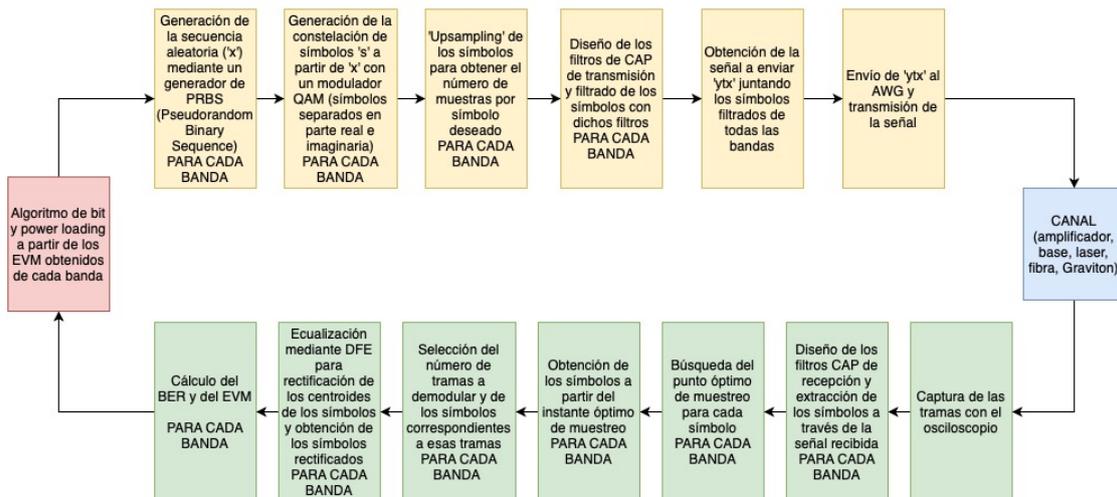


Figura 3.18. Esquema funcionamiento de MultiCAP empleado en las medidas de laboratorio

### 3.3.4. OFDM

En la Figura 3.19 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a OFDM. La generación de los símbolos se lleva a cabo de modo similar a MultiCAP. Después se concatenan los símbolos de todas las bandas y se lleva a cabo la ya citada IFFT (transformada inversa de Fourier). Después se añade el prefijo cíclico para evitar la interferencia entre bandas. Por último, se concatena una señal seno al principio de cada trama para poder detectarlas y sincronizarlas correctamente en recepción. El proceso inverso es realizado en recepción junto con la implementación de nuevo de un ecualizador (DFE) para la recuperación de la señal transmitida. Del mismo modo que en MultiCAP se aplica el algoritmo de *bit* y *power loading* para aumento de la tasa y eficiencia espectral. OFDM, a diferencia de MultiCAP, no precisa de la introducción de bandas de guarda dado que la ortogonalidad de las bandas y el CP aseguran que no haya interferencia entre las diferentes portadoras.

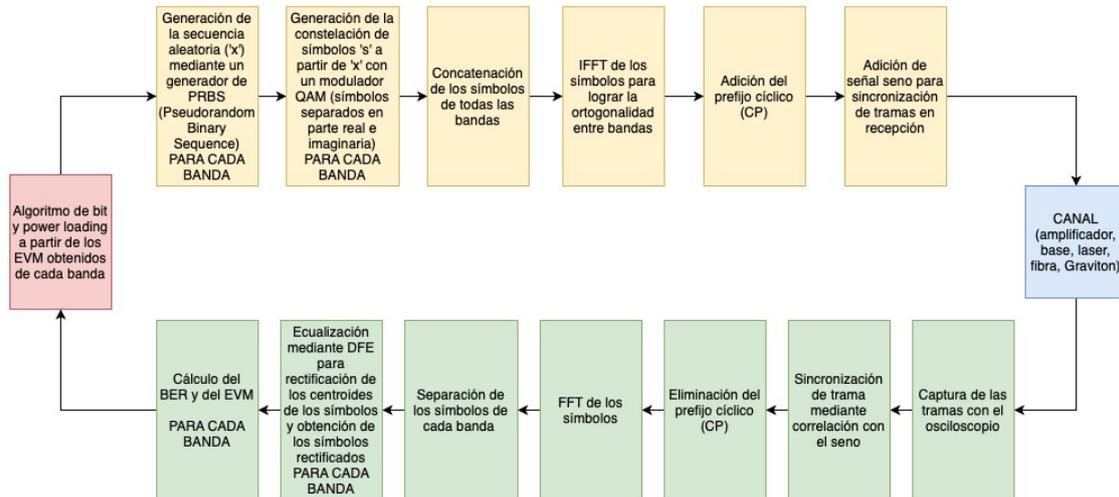


Figura 3.19. Esquema de funcionamiento de OFDM empleado en las medidas de laboratorio

## 4. RESULTADOS

En este apartado se va a llevar a cabo la presentación de los resultados obtenidos con las medidas experimentales realizadas en el laboratorio de comunicaciones ópticas del GTF. En el apartado previo se explicó cuál es el montaje final que se va a emplear para la realización de las medidas (ver Figura 3.12). Así pues, comenzaremos presentando los resultados obtenidos en orden desde las técnicas de modulación más sencillas empleadas a las más complejas.

Primeramente se presentarán los resultados obtenidos con los formatos de modulación que transmiten el flujo de datos empleando una única banda. Se compararán los resultados obtenidos con transmisión binaria NRZ y 4PAM con los mostrados en el estado del arte del apartado 2.4. Después se compararán los resultados obtenidos con CAP para ver si el uso de los filtros que emplea este formato de modulación suponen un beneficio en cuanto a tasa de transmisión y en cuanto a eficiencia espectral. Por último, se presentarán los resultados obtenidos con las modulaciones que dividen el espectro en diferentes bandas (MultiCAP y OFDM) y comprobaremos si dicha división del espectro en bandas supone una mejora en el sistema.

### 4.1. PAM (NRZ binario y multinivel) y CAP

Como ya se ha mencionado, el valor de BER que se va a establecer como umbral límite para considerar una transmisión de datos de calidades de  $3.8 \cdot 10^{-3}$ . De este modo para las modulaciones que transmiten los datos en una sola banda (PAM y CAP) se van a llevar a cabo pruebas comenzando con un ancho de banda de transmisión pequeño y aumentándolo progresivamente midiendo el BER en cada transmisión hasta llegar al valor límite de BER (umbral para FEC 7%). Debido a la variabilidad de las medidas (causadas por el número de tramas procesadas y la variabilidad de los propios componentes físicos del enlace) se ha realizado un promediado para obtener una gráfica de relación entre BER y ancho de banda (o tasa de bits) lo más suavizada posible.

Tras el barrido progresivo aumentando el ancho de banda, se calcula la tasa correspondiente multiplicando el valor de dicho ancho de banda por la eficiencia espectral del formato de modulación en cuestión. De este modo, tal y como se muestra en la **Error! Reference source not found.**, se obtienen una líneas que relacionan el valor de BER y permiten determinar la tasa máxima para cada tipo de modulación (las mostradas en la **Error! Reference source not found.**).



Figura 4.1. Relación BER con tasa de bits para las cuatro fibras

Como vemos en estas gráficas conforme se incrementa la tasa de bits el BER se degrada hasta superar el límite máximo exigido por el FEC.

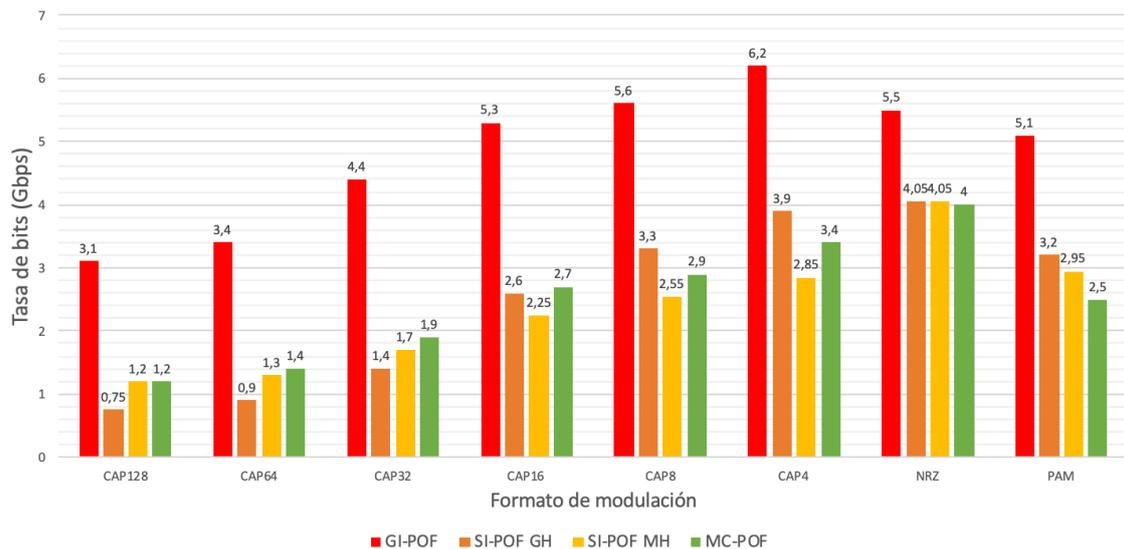


Figura 4.2. Tasas máximas alcanzables con formatos de modulación de banda única

En la Figura 4.2 se muestran los resultados resumen de las tasas máximas que se pueden extraer de las gráficas anteriores. Si bien no cabe duda que la fibra GI-POF ofrece unas prestaciones mucho mejores independientemente del formato, se observan otros detalles en las tasas alcanzables que se pueden relacionar con las respuestas frecuenciales de las fibras de la Figura 3.8. Para CAP128, CAP64 y CAP32 la fibra SI-POF GH ofrece peores prestaciones que la SI-POF MH, esto se debe a que para estos tres formatos el ancho de banda empleado está por debajo de los 700 MHz y como vemos

en la Figura 3.8. por debajo de dicho valor, el espectro de la fibra SI-POF MH está por encima del de la MH. Para anchos de banda mayores a 700 MHz la SI-POF GH pasa a dar tasas mayores. Ocurre lo mismo con la fibra MC-POF salvo que a partir de los 900 MHz aproximadamente. Consecuentemente para CAP8 y CAP4 la fibra MC-POF pasa a ser mejor que la SI-POF MH.

En resumen, en cuanto al tipo de fibra, se puede concluir que a pesar de la mayor atenuación de la fibra GI-POF, la dispersión más elevada de las otras tres fibras supone un factor más limitante y, por tanto, la GI-POF permite tasas mucho mayores gracias a su respuesta frecuencial plana.

En cuanto a los formatos de modulación observamos que sólo con CAP8 y CAP 4, y sólo con la fibra GI-POF, se consigue sobrepasar las tasas alcanzadas con transmisión binaria NRZ y 4PAM. Aunque la mejora no es excesiva, sí que resulta interesante dado que además de una mejor tasa con CAP8 tenemos una eficiencia espectral tres veces mayor que con NRZ binario. Una mayor eficiencia espectral supone que en condiciones en las que haya menos ancho de banda (por ejemplo, por uso de otros dispositivos más limitantes) se pueda mantener la tasa, mientras que con NRZ una limitación en el ancho de banda supondría la pérdida inmediata de tasa de transmisión.

Sin embargo, no debemos tener en cuenta solo la tasa de bits sino también la eficiencia espectral que mide el aprovechamiento que se hace del ancho de banda ocupado. Cuanto mayor sea este valor mayor es el aprovechamiento del ancho de banda. La eficiencia espectral para los formatos de modulación sencillos y para CAP se muestra en la Figura 4.3.

TÉCNICA DE MODULACIÓN	NRZ	PAM	CAP128	CAP64	CAP32	CAP16	CAP8	CAP4
EFICIENCIA ESPECTRAL (bits/s/Hz)	1	2	7	6	5	4	3	2
CONSTELACIÓN	2 niveles	4 niveles	128QAM	64QAM	32QAM	16QAM	8QAM	4QAM/QPSK

Figura 4.3. Eficiencia espectral y constelaciones para las técnicas de modulación sencillas

Se analizan ahora en las siguientes figuras (Figura 4.4 y Figura 4.5) la forma de los espectros de la señales enviada (rojo) y recibida (azul) y las constelaciones de algunos casos seleccionados de los resultados mostrados hasta ahora. En la Figura 4.4 se muestran los casos con NRZ binario y 4PAM con la fibra MC-POF de 50 metros. Para NRZ (a) el ancho de banda ocupado (al transmitir) es de 4 GHz y dado que la eficiencia espectral es 1 bit/s/Hz, la tasa medida es de 4 Gbps como se había mostrado en la Figura 4.2. Con 4PAM (b) ocurre lo mismo, ocupando un ancho de banda de 1.25 GHz que se corresponde con una tasa de 2.5 Gbps.

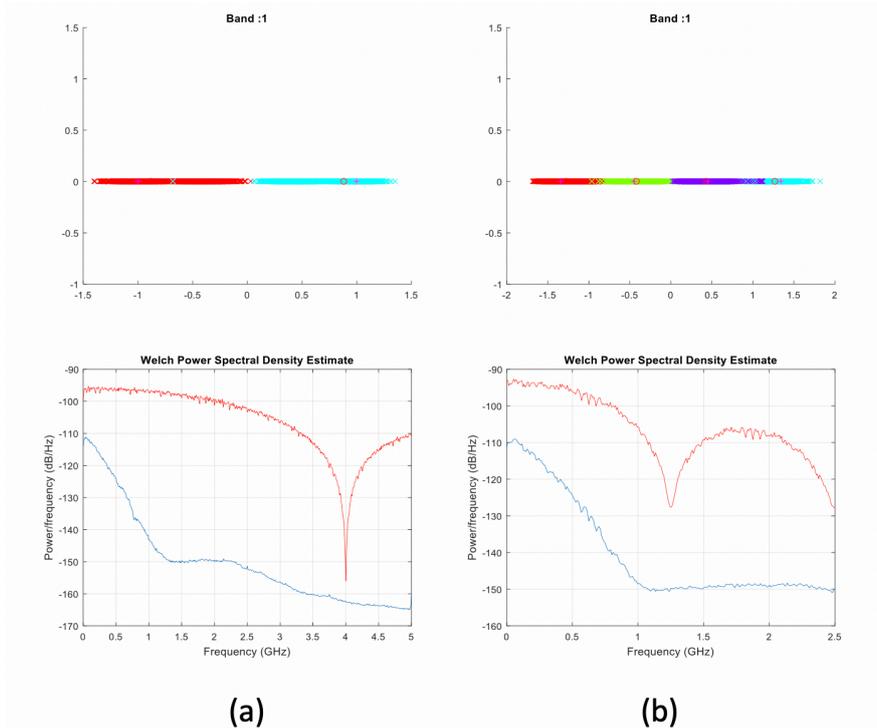


Figura 4.4. Constelaciones y respuesta frecuencial (señal transmitida en rojo y recibida en azul), para NRZ (a) y 4PAM (b) en fibra Multicore POF de 50 metros

En cuanto a las constelaciones, se aprecia que tienen una única dimensión al tratarse de modulaciones de amplitud. En la Figura 4.5 se muestran las constelaciones y espectros de las señales enviada y transmitida empleando CAP16 en los cuatro tipos de fibra. Se puede ver que el ancho de banda empleado con la fibra GI-POF (b) es mucho mayor, dado que como ya se ha mencionado presenta características mejores (respuesta plana por su baja dispersión) que limitan mucho menos el ancho de banda.

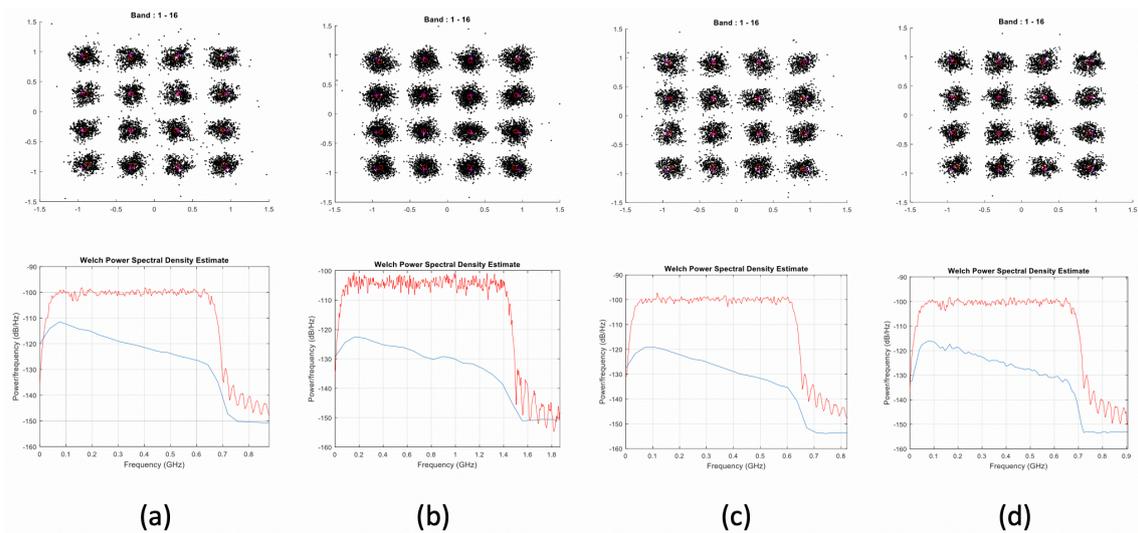


Figura 4.5. Constelaciones y respuesta frecuencial (señal transmitida en rojo y recibida en azul), para CAP16 en fibra SIPOF-GH (a), GIPOF (b), SIPOF-MH (c) y Multicore-POF (d)

Como resumen de esta sección se concluye que tan solo con CAP4 y CAP8 en la fibra GI-POF se consiguen mejoras respecto a los formatos más básicos de modulación. Con las fibras cuya respuesta en frecuencia cae bruscamente la transmisión con formatos de

modulación avanzados (CAP) empleando una única banda no resulta interesante ya que aumenta la complejidad y no logra mejoras. En el apartado siguiente veremos si la división en bandas del espectro supone una mejora.

## 4.2. MultiCAP y OFDM

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con las técnicas de modulación que dividen el espectro de la señal transmitida en bandas. Tras los procesos de *bit* y *power loading* (BL y PL) se habrá llegado al límite que marca la constelación que se puede enviar en cada banda. Las primeras medidas realizadas fueron empleando MultiCAP.

Para la comparación de los diferentes tipos de fibra se empleó un tamaño de banda de 100 MHz que permita un número de bandas significativo pero que no ralentice el tiempo de la medida dado que la duración del algoritmo de BL y PL aumenta exponencialmente con el número de bandas.

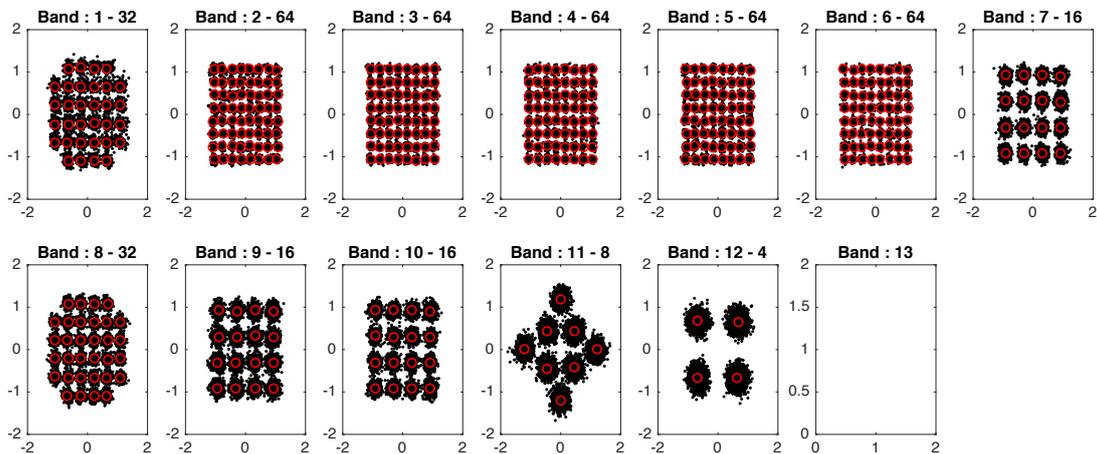


Figura 4.6. Constelaciones de las bandas empleando MultiCAP, bit loading y power loading en fibra SIPOF GH de 50 metros

En la Figura 4.6 se muestra el resultado obtenido con la fibra SI-POF GH. Como se aprecia, en un principio se transmitieron trece bandas de 100 MHz, pero la última fue apagada porque no cumplía los requisitos de EVM y BER para la constelación mínima (BPSK). La primera banda presenta peores características que la segunda debido a irregularidades en torno a la frecuencia 0 y por ello no puede alcanzar una constelación 64QAM como sus vecinas. Además, debido al cero que presenta la base donde se monta el láser en torno a 700 MHz, la banda siete presenta peores características que la ocho pudiendo transmitir solo una constelación 16QAM.

Al sumar el número de bits transmitidos en cada banda y multiplicarlo por el tamaño de las bandas se obtiene la tasa alcanzada, en este caso 5.7 Gbps. Tras el proceso inicial de BL las constelaciones obtenidas no eran las mismas alcanzando tan solo los 5.2 Gbps. Esto supone que el algoritmo de reasignación de potencias ha sido capaz de subir cinco bandas a un nivel de modulación mayor alcanzando esos 5.7 Gbps, lo que supone un aumento del 10% en la tasa de transmisión. Además si comparamos este caso con el

mejor de los obtenidos con las modulaciones simples (4.05 Gbps con NRZ) observamos que la mejora final es de aproximadamente un 30%.

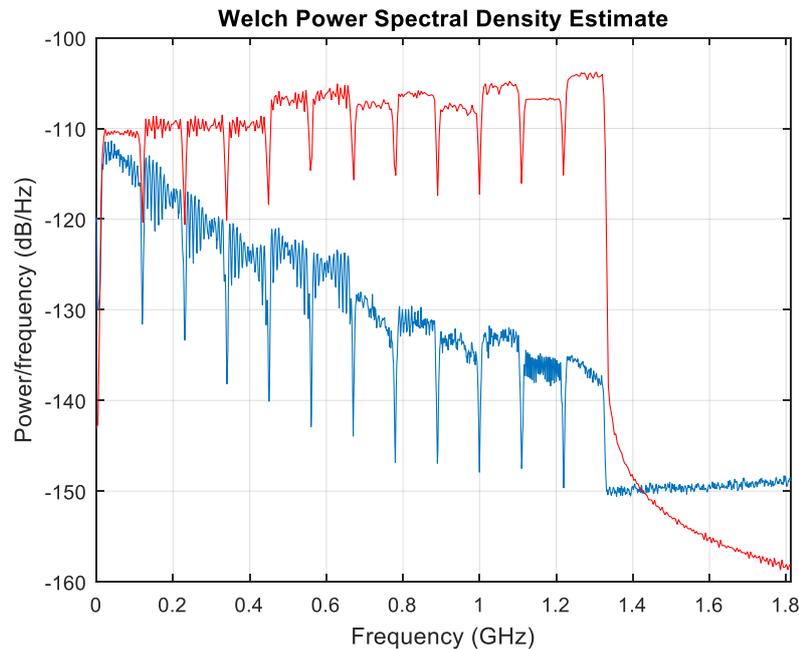


Figura 4.7. Espectro de las señales transmitida (rojo) y recibida (azul) con MultiCAP con bandas de 100MHz en fibra SIPOF GH de 50 metros

Al analizar el espectro de las señales transmitida y recibida de la Figura 4.7, podemos ver cómo la potencia asignada a cada banda es diferente, lo que ha permitido el aumento en la tasa obtenida. En cuanto a la eficiencia espectral, se aprecia que el ancho de banda ocupado es de 1.35 GHz. Dividiendo la tasa alcanzada entre el ancho de banda ocupado obtenemos una eficiencia espectral de 4.22 bits/s/Hz.

En la Figura 4.8 se resumen las tasas alcanzadas empleando MultiCAP con bandas de 100 MHz para los cuatro tipos de fibra tanto sólo con *bit loading* como con *bit* y *power loading*. Se muestran también las mejores tasas alcanzadas para cada fibra con los formatos sencillos (CAP4 con la GI-POF y NRZ con las demás fibras). La mejora es evidente tanto frente a CAP como frente a NRZ y 4PAM. Se alcanzan tasas que superan a las anteriores, siendo mayor la mejora para la fibra GI-POF debido a su respuesta plana en frecuencia que, como se aprecia, responde mejor a la división en bandas.

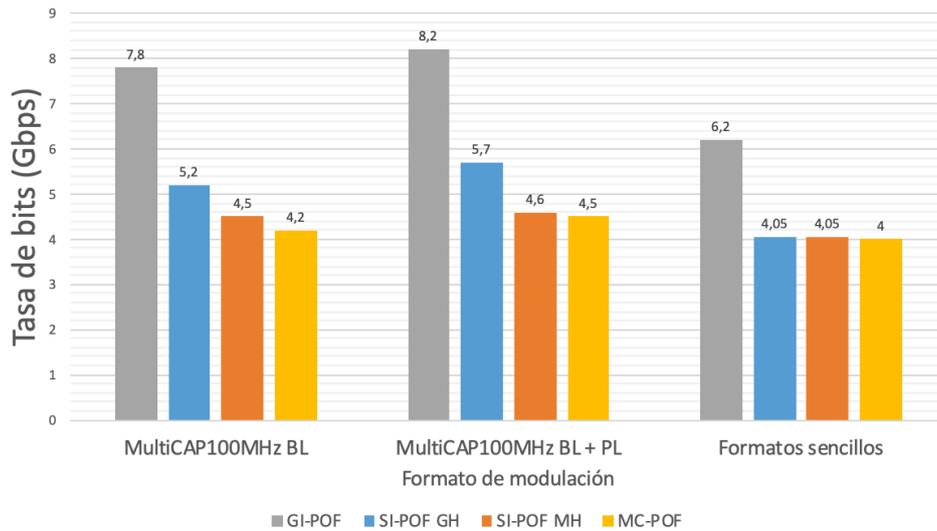


Figura 4.8. Tasa de bits con MultiCAP con Bit loading, con Bit y Power Loading y con formatos sencillos para diferentes fibras de 50 metros

La eficiencia espectral se muestra en la Figura 4.9. No sólo se consigue aumentar la tasa en gran medida sino que se es capaz de hacerlo sin emplear mucho más ancho de banda. Se aprecia que las eficiencias espectrales están en torno a 4 bits/s/Hz o incluso llegando a más de 5 bits/s/Hz con la fibra GI-POF. Además, para todos los tipos de fibras implementar el algoritmo de *power loading* supone una mejora en la tasa y en la eficiencia espectral. Respecto a los formatos simples la mejora que introduce la división en bandas en cuanto a eficiencia espectral es muy grande.

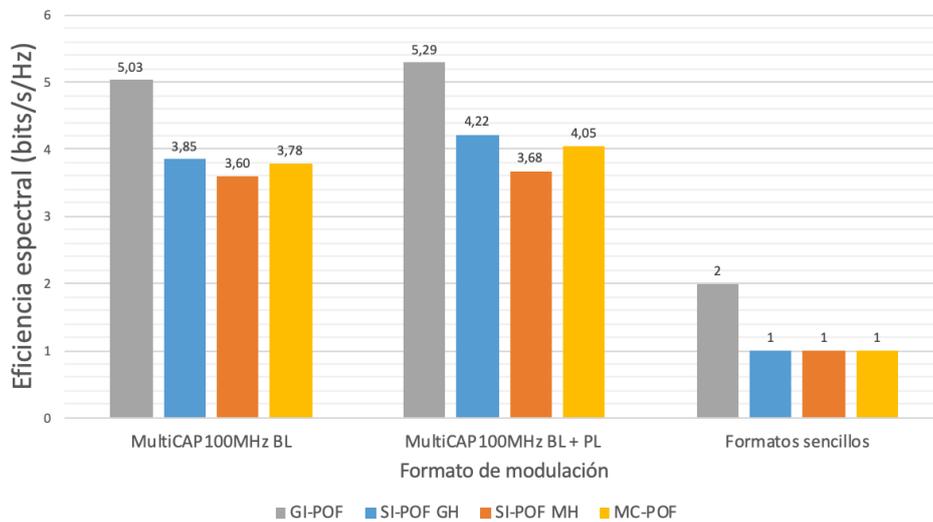


Figura 4.9. Eficiencia espectral con MultiCAP con Bit Loading, con Bit y Power Loading y con formatos sencillos para diferentes fibras de 50 metros

Con estas medidas queda demostrado que el uso de formatos de modulación avanzado como MultiCAP y la división del espectro en bandas suponen una considerable mejora en las prestaciones del sistema.

A continuación, se analiza como cambian los resultados dependiendo del tamaño de cada banda (y por tanto el número total de bandas). Se muestran en las siguientes figuras las constelaciones (Figura 4.10) y espectros en transmisión y recepción (Figura

4.11) para tres casos diferentes implementados sobre la fibra GI-POF de 50 metros. La anchura de las bandas es de 200 MHz (a), de 100 MHz (b) y de 50 MHz (c).

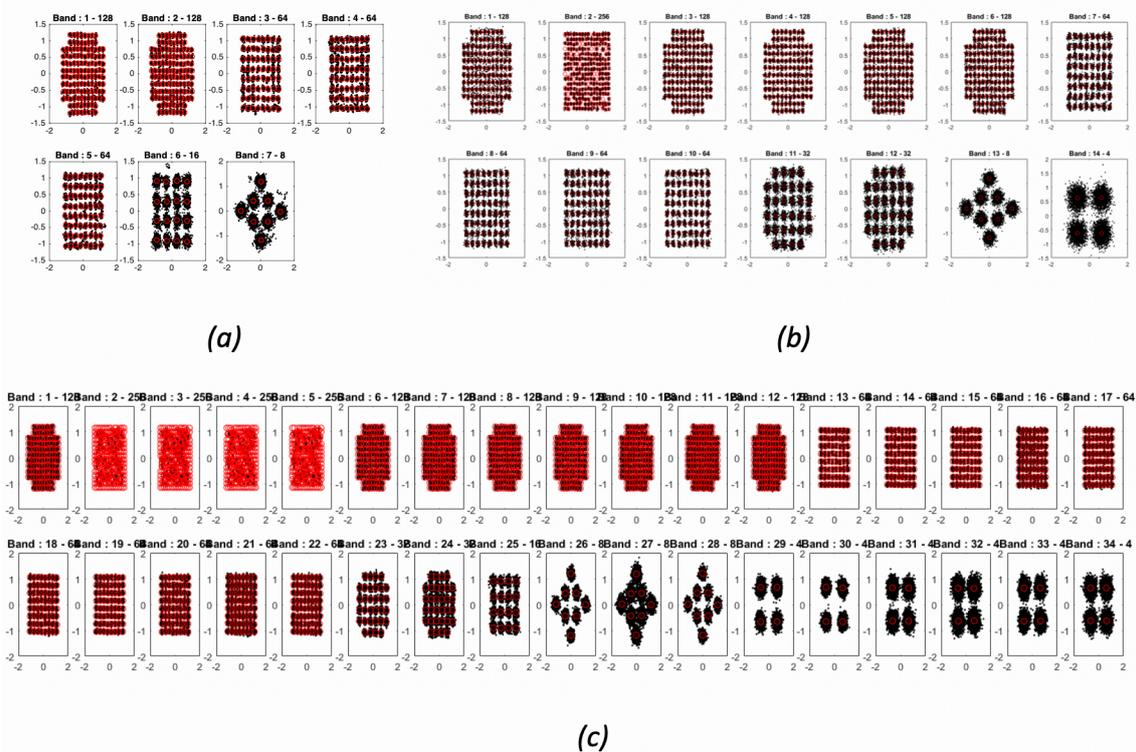


Figura 4.10. Constelaciones con MultiCAP para diferente tamaño de banda (a) 200 MHz (b) 100 MHz (c) 50 MHz en fibra GIPOF de 50 metros

El tamaño de las bandas transmitidas es fundamental a la hora de maximizar las prestaciones del sistema. En principio, cabe pensar que cuantas más bandas haya, mejor será la adaptación a las características del espectro. Sin embargo, un número demasiado elevado de bandas supondría perder demasiadas frecuencias entre las bandas debido a las necesarias bandas de guarda. Además, el algoritmo de *power loading* se prolongaría durante excesivo tiempo en caso de un número excesivo de bandas como se puede intuir de la Figura 4.11 (c).

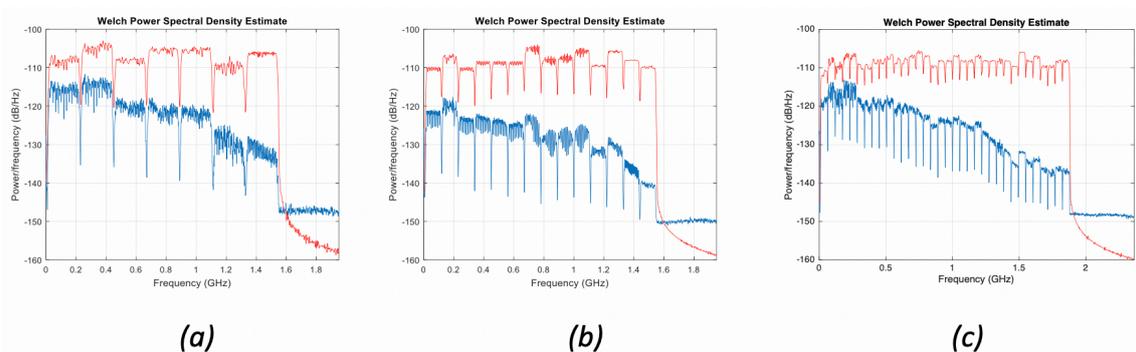


Figura 4.11. Espectro frecuencial de las señales transmitida (rojo) y recibida (azul) con MultiCAP para diferentes tamaños de banda (a) 200 MHz (b) 100 MHz (c) 50 MHz en fibra GIPOF de 50 metros

En la Figura 4.12 se muestran las tasas de transmisión alcanzadas con los diferentes tamaños de banda considerados comparándolas con las tasas y eficiencias espectrales

obtenidas con los formatos sencillos (para la fibra GI-POF). La tasa mayor se consigue empleando las bandas mas estrechas de los tres casos (50 MHz). Esto indica que, en este caso, la división en más bandas permite una mejor adaptación a la respuesta frecuencial del sistema. Además, para los tres tamaños de banda el algoritmo de optimización supone una mejora tanto en la tasa de transmisión como en la eficiencia espectral. La eficiencia espectral es relativamente similar para los tres casos, siendo siempre considerablemente mayor que la de las técnicas de modulación sencillas. En resumen, MultiCAP ha demostrado dar mejores prestaciones que los formatos sencillos tanto en cuanto a tasa de bits como en eficiencia espectral.

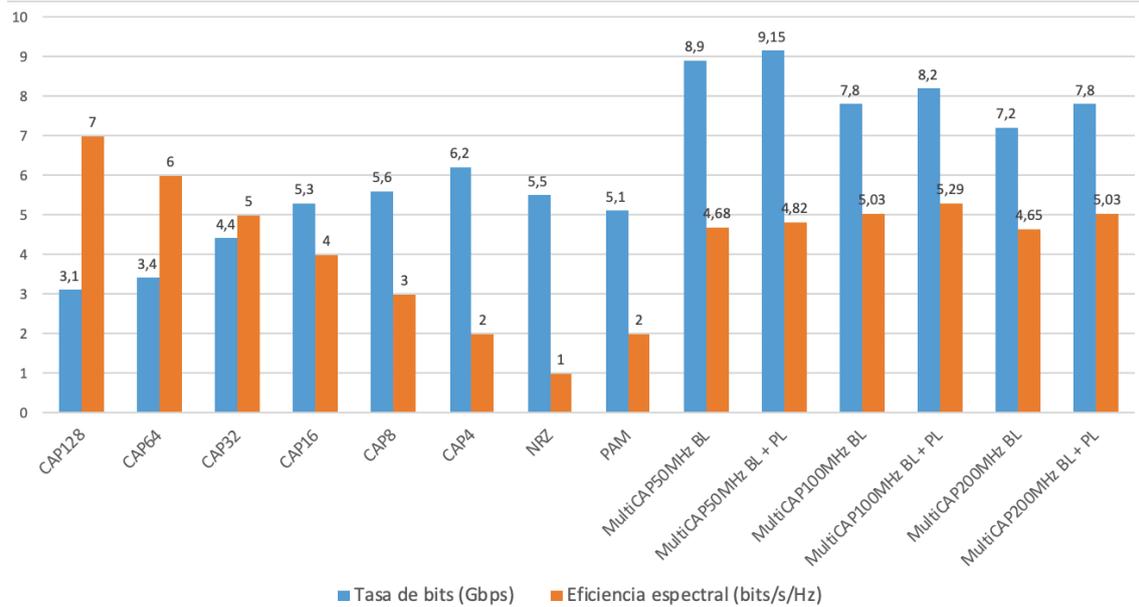


Figura 4.12. Tasa y eficiencia espectral para MultiCAP con diferentes técnicas de modulación en fibra GIPOF de 50 metros

En el caso de OFDM se han realizado unas primeras pruebas de funcionamiento. Se muestran a continuación los resultados obtenidos en la fibra GI-POF. A priori se espera un resultado similar a MultiCAP, que sea capaz de mejorar las prestaciones que ofrecen los formatos de modulación sencillos. En el caso que se muestra a continuación se llevó a cabo una transmisión con 31 bandas ocupando un ancho de banda de 2 GHz. Tras el algoritmo de *bit loading* las dos últimas bandas fueron apagadas ocupando un ancho de banda total final de aproximadamente 1.8 GHz.

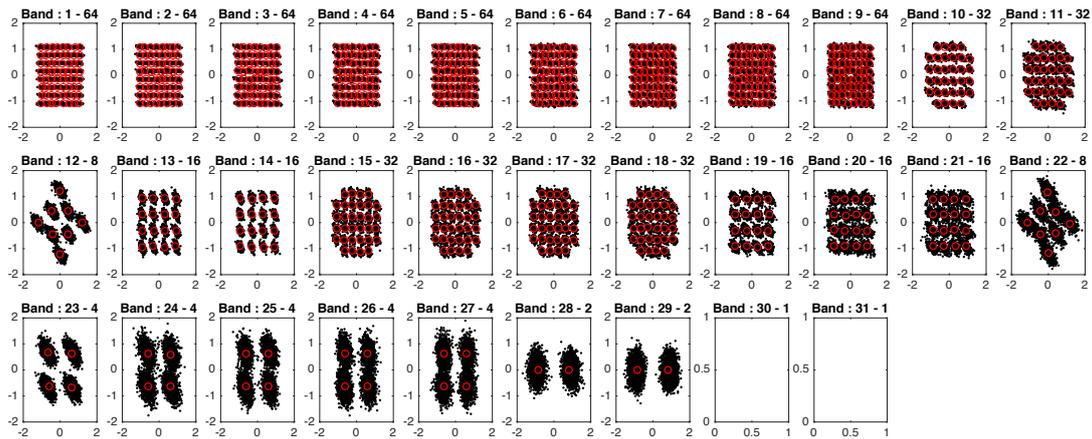


Figura 4.13. Constelaciones con OFDM con 31 bandas y 2GHz de ancho de banda inicial en fibra GIPOF de 50 metros

El ancho de cada subbanda se calcula dividiendo el ancho de banda total (2 GHz) entre el número de bandas (31), obteniendo un tamaño de subbanda de 54.5 MHz, similar a uno de los tres casos mostrados con MultiCAP. Del mismo modo que con MultiCAP atendiendo a las constelaciones de la Figura 4.13 y los bits empleados en cada banda obtenemos que la tasa total transmitida tras el algoritmo de BL y PL es de 6.65 Gbps. La mejora respecto a los formatos sencillos no es tan grande como con MultiCAP pero también se logra el aumento de la tasa de bits.

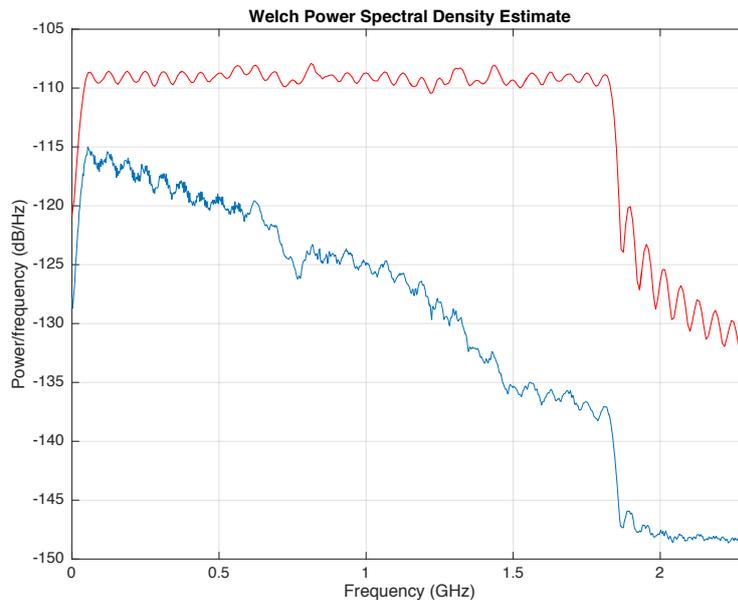


Figura 4.14. Espectro frecuencial de las señales transmitida (roja) y recibida (azul) con OFDM con 31 bandas y 2 GHz de ancho de banda iniciales en fibra GIPOF de 50 metros

En la Figura 4.14 se muestra el espectro obtenido en este caso. Se aprecia claramente, al igual que en los otros casos, el nulo de la base en 700 MHz. En cuanto a la eficiencia espectral, se calcula dividiendo la tasa de bits entre el ancho de banda empleado. Esto da un valor de 3.7 bits/s/Hz.

En cuanto a los otros tres tipos de fibra, se obtienen tasas algo superiores a 4 Gbps que no superan demasiado a NRZ binario. Sin embargo, si que se aprecia una mejora

considerable en cuanto a eficiencia espectral dado que se obtienen valores de entre 3 y 4 bits/s/Hz. Así, aunque con OFDM no se ha obtenido una mejora excesiva en cuanto a tasa de transmisión frente a los formatos sencillos, la mejora en la eficiencia espectral si que es más acusada. Para estudios futuros se propone la optimización del funcionamiento de OFDM con el objetivo de mejorar más sus prestaciones.

## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado final se realiza un análisis resumen de los resultados obtenidos y de sus consecuencias de cara a estudios futuros. Se explica como se ha cumplido los objetivos del trabajo y se analiza los beneficios y desventajas del uso de técnicas de modulación avanzadas.

### 5.1. CONCLUSIONES

En el apartado de resultados se ha demostrado que el uso de formatos avanzados que dividen el espectro de transmisión en diferentes subbandas supone una mejora de las prestaciones del sistema. Durante el desarrollo de este trabajo se ha buscado el aumento de la tasa de bits y de la eficiencia espectral. La división en bandas del espectro permite una mejor adaptación a las características espectrales del sistema de transmisión empleado. Además con los algoritmos de optimización empleados, se ha demostrado una mejora aún mayor respecto a los formatos que transmiten empleando una sola banda.

La tasa de bits es, generalmente, el objetivo de los estudios realizados en el campo de las comunicaciones. En este aspecto, MultiCAP y, en menor medida, OFDM han demostrado alcanzar tasas de bits superiores a las medidas con los formatos sencillos. Concretamente la fibra GI-POF, que ya había demostrado sus mejores características para formatos simples respecto a las fibras SI-POF y a la MC-POF, responde mejor a la división en bandas del espectro llegando a alcanzar 9.15 Gbps que supone un aumento del 32% respecto al mejor de los resultados obtenidos con CAP (4CAP), del 40% respecto a NRZ binario y del 44% respecto a 4PAM.

La eficiencia espectral se suele dejar en un segundo plano en muchos estudios. Sin embargo, se trata de un parámetro fundamental a la hora de implementar sistemas de comunicaciones ópticas en aplicaciones reales. Una eficiencia espectral elevada supone que el aprovechamiento del ancho de banda disponible es muy bueno. Habrá casos en los que, por los dispositivos empleados en un sistema de transmisión concreto, se presenten anchos de banda pequeños que limiten la transmisión con modulaciones sencillas como NRZ binario o 4-PAM, que debido a sus bajas eficiencias espectrales no permitirían tasas de bits altas en sistemas con anchos de banda pequeños. Por el contrario, MultiCAP y OFDM presentan eficiencias espectrales mucho mayores. Con la fibra GI-POF se ha alcanzado una eficiencia espectral de en torno a 5 bits/s/Hz con MultiCAP, esto es, el quintuple que la obtenida con NRZ binario y más del doble (2.5 veces) que con 4-PAM o CAP4. Las técnicas avanzadas de modulación nos permitirán el máximo aprovechamiento del ancho de banda disponible independientemente de las características espectrales del sistema de transmisión empleado.

La reflexión que queda por hacer es en cuanto al compromiso entre la mejora de las prestaciones obtenida con MultiCAP y OFDM frente al aumento en la complejidad del sistema que suponen. La elección de una técnica de modulación u otra dependerá de la aplicación en la que se quiera implementar el sistema de transmisión con POF. En caso

de que una tasa de bits alta sea necesaria o que tengamos limitaciones de ancho de banda que exijan eficiencias espectrales elevadas, será más conveniente emplear formatos más avanzados como MultiCAP. Sin embargo, si lo que interesa es un sistema lo más sencillo posible quizá resulte más interesante emplear formatos de modulación sencillos que no aumenten la complejidad del sistema.

## 5.2. LÍNEAS FUTURAS

Tras haber demostrado los beneficios del uso de técnicas de modulación avanzadas en sistemas de comunicación con fibra óptica de plástico queda la puerta abierta a la realización de nuevos experimentos que utilicen otro tipo de modulaciones avanzadas. El primer paso podría ser la optimización en el procesamiento de señal con OFDM y la realización de nuevas medidas con los mismos tipos de fibras para ver si se logra mejorar la tasas de transmisión tanto como con MultiCAP.

Un posible segundo paso sería la implementación de formatos de modulación más recientes como son los sucesores de OFDM que se están tratando de implementar en 5G tales como UFMF, GFDM y FBMC. Estos formatos presentan avances en cuanto a eficiencia espectral respecto a OFDM gracias a la supresión del prefijo cíclico y es esperable que puedan dar mejores resultados que OFDM e incluso también que MultiCAP.

Por otro lado, también puede ser interesante la realización de nuevas medidas empleando los mismos formatos que en este trabajo pero en fibras de otras longitudes diferentes, por ejemplo, con fibras de más de 100 metros de longitud. También podría resultar interesante el uso de otro tipo de fibras de plástico que presenten otras características diferentes a las empleadas en este trabajo.

Por último, como futuro avance dentro del propio montaje, la adquisición de un emisor con mejores características espectrales que la base podría suponer una mejora muy considerable en las prestaciones del sistema. La base ha sido el elemento más limitante por el cero que presenta en 700 MHz y porque es el dispositivo que más limita el ancho de banda. Con un emisor que permitiera un mayor ancho de banda de transmisión para la señal óptica sin duda se podrían alcanzar tasas de bits mayores.

## REFERENCIAS

- [1] O. Strobel, "Optical and microwave technologies for telecommunications networks," vol. 10.2 Polym, pp. 306–328.
- [2] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, *POF Handbook*. 2008.
- [3] M. P. Equalizer, I. N. Osahon, M. Safari, and W. O. Popoola, "10-Gb / s Transmission Over 10-m SI-POF With," *2018 IEEE Photonics Conf.*, vol. 30, no. 10, pp. 911–914, 2018.
- [4] F. Forni, Y. Shi, H. Van Den Boom, E. Tangdiongga, and T. Koonen, "Multiband LTE-A and 4-PAM Signals over Large-Core Plastic Fibers for In-Home Networks," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, no. 20, pp. 2281–2284, 2016.
- [5] I. N. Osahon, S. Rajbhandari, and W. O. Popoola, "Performance comparison of equalization techniques for SI-POF multi-gigabit communication with PAM- M and device non-linearities," *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 11, pp. 2301–2308, 2018.
- [6] R. Kruglov, S. Loquai, C. A. Bunge, M. Schueppert, J. Vinogradov, and O. Ziemann, "Comparison of PAM and CAP modulation schemes for data transmission over SI-POF," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 23, pp. 2293–2296, 2013.
- [7] M. Atef, R. Swoboda, and H. Zimmermann, "1.25 Gbit/s over 50 m step-index plastic optical fiber using a fully integrated optical receiver with an integrated equalizer," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 118–122, 2012.
- [8] C. Gimeno, E. Guerrero, C. Sánchez-Azqueta, G. Royo, C. Aldea, and S. Celma, "Continuous-Time Linear Equalizer for Multigigabit Transmission Through SI-POF in Factory Area Networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6530–6532, 2015.
- [9] F. Breyer, S. C. J. Lee, S. Randel, and N. Hanik, "1.25 Gbit/s transmission over up to 100 m standard 1 mm step-index polymer optical fibre using FFE or DFE equalisation schemes," no. 1, pp. 966–966, 2008.
- [10] R. Kruglov *et al.*, "Eye-safe data transmission of 1.25 Gbit/s over 100-m SI-POF using green laser diode," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 167–169, 2012.
- [11] S. Loquai, R. Kruglov, C. A. Bunge, O. Ziemann, and B. Schmauss, "10-Gb/s pulse-amplitude modulated transmission over 1-mm large-core polymer optical fiber," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 851–853, 2012.
- [12] D. Zeolla, A. Antonino, G. Bosco, and R. Gaudino, "DFE versus MLSE electronic equalization for gigabit/s SI-POF transmission systems," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 8, pp. 510–512, 2011.
- [13] G. Stepniak and J. Siuzdak, "Experimental investigation of PAM, CAP and DMT modulations efficiency over a double-step-index polymer optical fiber," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 369–373, 2014.
- [14] S. Loquai, R. Kruglov, C. A. Bunge, O. Ziemann, B. Schmauss, and J. Vinogradov, "10.7-Gb/s discrete multitone transmission over 25-m bend-insensitive multicore polymer optical fiber," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 21, pp. 1604–1606, 2010.
- [15] X. Li, J. L. Wei, N. Bamiedakis, R. V. Penty, and I. H. White, "Avalanche photodiode enhanced PAM-32 5 Gb/s LED-POF link," *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, pp. 4–6, 2014.

- [16] R. Kruglov, J. Vinogradov, O. Ziemann, T. Hochschule, N. Georg, and S. Ohm, "GIGABIT TRANSMISSION OVER STANDARD POF BEYOND 50M."
- [17] H. Yang *et al.*, "Plastic Optical Fiber Based on Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation," *Lightwave*, vol. 28, no. 4, pp. 352–359, 2010.
- [18] S. C. J. Lee *et al.*, "Discrete multitone modulation for maximizing transmission rate in step-index plastic optical fibers," *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 11, pp. 1503–1513, 2009.
- [19] M. Beltrán, Y. Shi, C. Okonkwo, R. Llorente, E. Tangdiongga, and T. Koonen, "In-home networks integrating high-capacity DMT data and DVB-T over large-core GI-POF," *Opt. Express*, vol. 20, no. 28, p. 29769, 2012.
- [20] S. Loquai, R. Kruglov, C. A. Bunge, O. Ziemann, B. Schmauss, and J. Vinogradov, "10.7-Gb/s discrete multitone transmission over 25-m bend-insensitive multicore polymer optical fiber," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 21, pp. 1604–1606, 2010.
- [21] S. Loquai *et al.*, "Comparison of modulation schemes for 10.7 Gb/s transmission over large-core 1 mm PMMA polymer optical fiber," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 13, pp. 2170–2176, 2013.
- [22] S. Karabetsos, E. Pikasis, T. Nikas, A. Nassiopoulos, and D. Syvridis, "DFT-spread DMT modulation for 1-Gb/s transmission rate over 100 m of 1-mm SI-POF," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 836–838, 2012.
- [23] N. M. Ridzuan, M. F. L. Abdullah, M. B. Othman, and M. B. Jaafar, "A Carrierless Amplitude Phase (CAP) modulation format: Perspective and prospect in optical transmission system," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 585–595, 2018.
- [24] L. Geng, R. V. Penty, I. H. White, and D. G. Cunningham, "FEC-Free 50 m 1.5 Gb/s Plastic Optical Fibre Link Using CAP Modulation for Home Networks," *2012 38th Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun.*, p. Th.1.B.4, 2013.
- [25] J. L. Wei, L. Geng, D. G. Cunningham, R. V. Penty, and I. H. White, "Gigabit NRZ, CAP and optical OFDM systems over POF links using LEDs," *Opt. Express*, vol. 20, no. 20, p. 22284, 2012.
- [26] C. Zerna, J. Sundermeyer, A. Fiederer, N. Verwaal, B. Offenbeck, and N. Weber, "Integrated PAM2 decision feedback equalizer for gigabit ethernet over standard SI-POF using red LED," *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, vol. 1–2, pp. 1–3, 2010.
- [27] J. L. Wei, L. Geng, D. G. Cunningham, R. V. Penty, and I. H. White, "Comparisons between gigabit NRZ, CAP and optical OFDM systems over FEC enhanced POF links using LEDs," *Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, vol. 64, pp. 1–4, 2012.
- [28] I. N. Osahon, S. Rajbhandari, and W. O. Popoola, "SI-POF Transmission with CAP Modulation and Split-Complex MLP Equalizer," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2018-May, pp. 1–6, 2018.
- [29] N. Cvijetic, "OFDM for next-generation optical access networks," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 384–398, 2012.
- [30] B. Cardiff, M. F. Flanagan, F. Smyth, L. P. Barry, and A. D. Fagan, "On bit and power loading for OFDM over SI-POF," *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 10, pp. 1547–1554, 2011.
- [31] J. Campello, "Practical Bit Loading for DMT," *Proc. ICC*, pp. 801–805, 1999.
- [32] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham, "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 773–775, 2002.

# ANEXO I: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL ENLACE POF

## Product Specification Sheet

**THORLABS**

### Laser Diode



L650P007



### Description

Thorlabs Ø5.6 mm, TO-18 can package discrete laser diode is a compact light source suited to many applications. Our lasers are fully compatible with our entire line of Laser Diode and TEC Controllers as well as our selection of Laser Diode Mounts and Collimation Solutions.

### Specifications

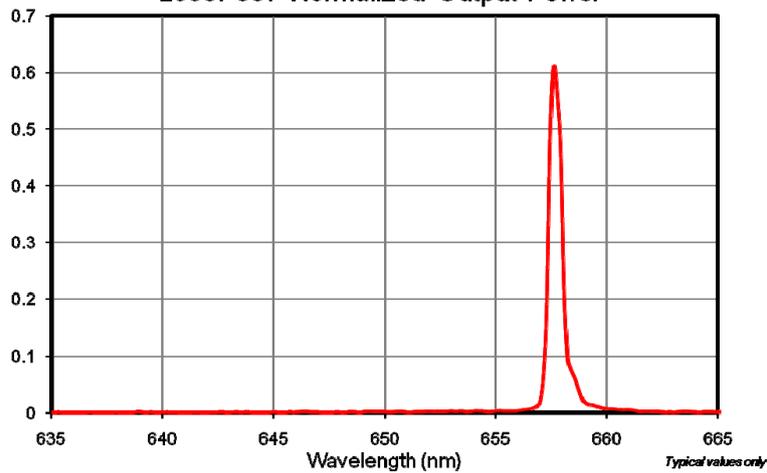
( $P_o = 7 \text{ mW}$ ,  $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Specification	Symbol	Max
LD Reverse Voltage, V	$V_{R(LD)}$	2
PD Reverse Voltage, V	$V_{R(PD)}$	30
Operation Case Temperature, $^\circ\text{C}$	$T_{op}$	-10 to 70
Storage Temperature, $^\circ\text{C}$	$T_{STG}$	-40 to 85

Specification	Symbol	Min	Typ	Max
Wavelength, nm	$\lambda_p$	640	650	660
Output Power, mW	$P_o$	-	7	10
Threshold Current, mA	$I_{th}$	-	20	25
Operation Current, mA	$I_{op}$	-	28	35
Operating Voltage, V	$V_{op}$	-	2.2	2.6
Beam Divergence, deg	$\theta_{//}$	5	9	12
	$\theta_{\perp}$	24	28	32
Slope Efficiency, mW/mA	$\eta$	0.6	1	1.3
Monitor Current, mA	$I_m$	-	0.12	0.3
Astigmatism, $\mu\text{m}$	$A_s$	-	-	15
	$\theta_{//}$	-3	-	3
Beam Angle Deviation, deg	$\theta_{\perp}$	-3	-	3
	$\Delta X$	-80		80
Emission Point Accuracy, $\mu\text{m}$	$\Delta Y$	-80		80
	$\Delta Z$	-80		80



L650P007 Normalized Output Power



21024-501 Rev A - April 1, 2010  
Specifications subject to change without notice.



# **LDM9T** **Laser Mount with TEC and** **Controller**

## **User Guide**



## Chapter 8 Specifications

Performance Specifications	
Lasers Supported	Ø5.6mm and Ø9mm Laser Diodes
Max Laser Current	200 mA ( $T_{\text{ambient}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , VLD = 3 V)
Laser Diode Compliance Voltage	7.5 V
Laser Pin Configurations	All LD Packages Except Style "F"
LDC Modulation Frequency	DC to 200 kHz
RF Modulation Frequency*	200 kHz to 1 GHz
RF Input Impedance	50 $\Omega$
Maximum RF Power	250 mW
Maximum TEC Current	1 A (Internally Regulated)
TEC Heating/Cooling Capacity	0.5 W ( $T_{\text{ambient}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , TLD = 20 $^{\circ}\text{C}$ ) See SOA Curve, page 12
Typical Temperature Range	20 to 30 $^{\circ}\text{C}$
Temperature Stability	<0.02 $^{\circ}\text{C}$ (1 hour) <0.05 $^{\circ}\text{C}$ (24 hour)
Typical Settling Time	<2 min heating, <3 min cooling
Temperature Sensors	10 k $\Omega$ Thermistor $\pm 2\%$ @ 25 $^{\circ}\text{C}$ , NTC
Operating Temperature	10 to 30 $^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	-20 to 70 $^{\circ}\text{C}$

\*Modulate Low Frequencies Through LD Controller

Power Supply Specifications	
TEC Power Supply	Desktop Switching Supply
Supply Input	12 W
Supply Voltage Output	5 VDC

Physical Specifications	
Laser Polarity Select	Internal Slide Switches
Laser Interface	DB9 Female
Power Supply Connector	2.5mm Power Jack
RF Input Connector	SMA Jack
Interlock Connector	2.5 mm Phono Jack
Indicators	LD Enabled Green LED, Power On Green LED
Size (L x W x H)	3.09" x 2.89" x 1.79" (78.4 mm x 73.3 mm x 45.5 mm)
Weight	0.56 lbs. (1.55 lbs. ship weight)
Mounting Threads	3x #8-32 (3x M4-0.5 for LDM9T/M)

**RF Modulation**

RF modulation can be accomplished in one of two ways. For low frequencies (below ~200 kHz), the RF modulator should be connected to the LD controller. Figure 10 shows the performance using the LDC202C. Above 200 kHz, the modulator should be connected to the mount's SMA connector. The mount has been tested up to 1 GHz, (see Figure 11 below).

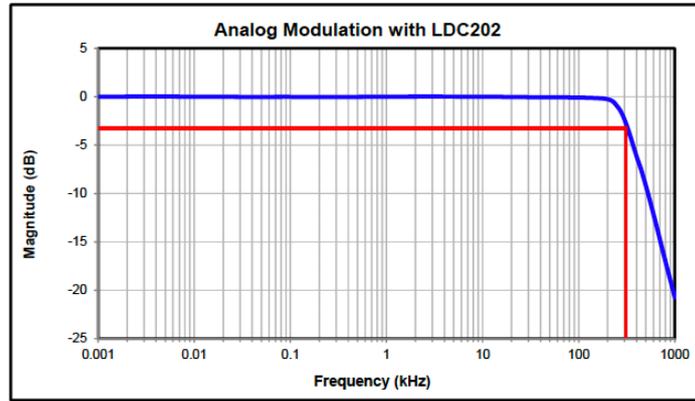


Figure 10 *Low Frequency Modulation Through LD Controller*

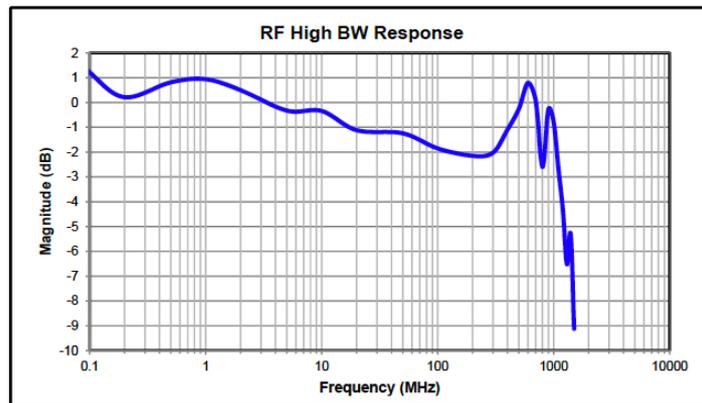
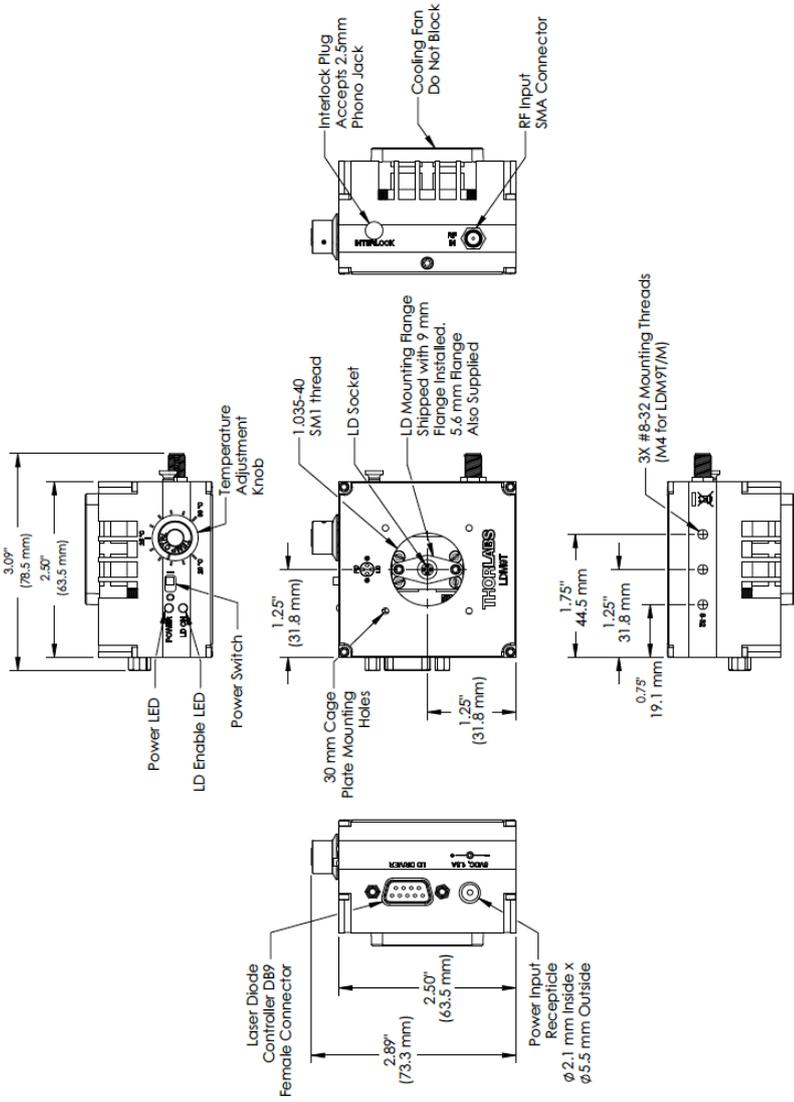


Figure 11 *RF Modulation Through SMA Connector on LM9LP*

Chapter 9 Mechanical Drawing

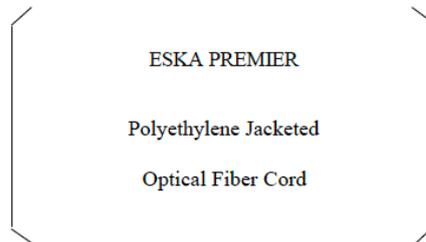


Issued in July ,2001

No. DPF1212-17

## Specification Sheet

### GH 4001



High - Performance Plastic Optical Fiber

**E s k a<sup>TM</sup>**

MITSUBISHI RAYON CO., LTD.  
ESKA OPTICAL FIBER DIVISION

6-41 Kounan 1-Chome, Minato-ku, Tokyo, Japan

Phone : + 81 - 3 - 5495 - 3060

Facsimile : + 81 - 3 - 5495 - 3212

— 1 —

1.Scope

This specification covers basic requirements for the structure, optical and mechanical performances of GH4001 .

2.Structure

Item		Specification			
		Unit	Min.	Typ.	Max.
Optical Fiber	Core Material	—	Polymetyl - Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Polymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Refractive Index Profile	—	Step Index		
	Numerical Aperture	—	0.5		
	Core Diameter	μm	920	980	1,040
	Cladding Diameter	μm	940	1,000	1,060
Jacket	Material and Color	—	Polyethylene		
	Diameter	mm	2.13	2.20	2.27
	Indication on the Jacket	—	ESKA PREMIER ; Pink color		
Approximate Weight		g / m	4		

ESKA PREMIER :Pink color

Sectional View

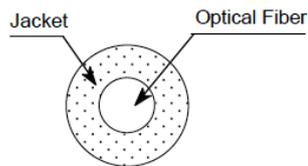


Table2		GH 4001				
		Item	Acceptance Criterion and / or [Test Condition ]	Specification		
Unit	Min.			Typ.	Max.	
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration [ in a Dry Atmosphere ]	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties* [ in a Dry Atmosphere ]	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature in a Moist Atmosphere	No Deterioration in Optical Properties** [ under 95 %RH ]	°C	—	—	+ 75
Optical Properties	Transmission Loss	650 nm Collimated Light ]	dB/km	—	—	170
	Transmission Loss under 95 %RH	650 nm Collimated Light ]	dB/km	—	—	190
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment $\leq$ 0.5 dB [ A Quarter Bend ]	mm	25	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment $\leq$ 1 dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	Times	10,000	—	—
	Tensile Strength	[Tensile Force at 5Åi Elongation; in Conformity to the JIS C 6861 ]	N	70	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment $\leq$ 1 dB [ Sample Length : 1 m Tensile Force : 4.9 N ]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment $\leq$ 1 dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	N.m	0.4	—	—

All tests are carried out under temperature of 25°C unless otherwise specified.

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

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

The specification is subject to change without notice.

The information contained herein is presented as a guide for the product selection. Please contact our business department for the issue of an official specification sheet.

# FiberFin®



## OM-Giga-SE100

### Graded-Index Plastic Optical Fiber

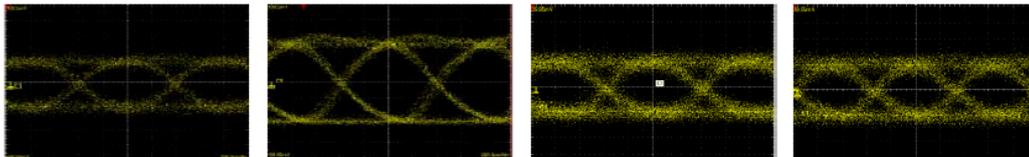
OM-Giga is a poly (methyl methacrylate)-based GI-POF for high-speed short-distance data-communication applications. It does not contain any refractive-index modifying dopant, and has excellent mechanical properties and thermal stability.

*This plastic fiber optic cable (PMMA) 1000 micron core, PE jacketed cable has a 2.2mm outer diameter jacket that can be used on any of our standard connectors, F05 Toslink, SMA, ST, Agilent and Light-Seal connectors. The SE100 can be easily terminated with any of the FiberFin hand tools or diamond finishing for that consistent high quality finish.*

Property	Unit	SE-100	Remarks
Fiber Diameter (core)	mm	1.00 (0.9)	
Variation of Fiber Diameter	%	± 5	
Jacket Diameter	mm	2.2	
Variation of Jacket Diameter	%	± 5	
Jacket Material		Polyethylene	Black
Type of cable		Simplex	
Tensile Strength	N	> 70	at break
Bending Radius	mm	25	
Operating Temperature	°C	-30 ~ 70	
Attenuation *	dB/km	< 200	at 650 nm
Bandwidth	GHz	> 1.5	at 100 m

- Recommended for short-distance applications less than 50 meters
- Although longer distance is possible depending on the Tx-Rx used

#### Eye – Pattern (Jacket Fiber)



(a) 1.25 Gbps Back to Back      (b) 1.25 Gbps After 50m      (c) 1.25 Gbps After 100m      (d) 1.5 Gbps After 100m

**For additional information or to purchase the product, please contact**

FiberFin, Inc. (www.fiberfin.com)  
 201 Beaver Street,  
 Yorkville, Illinois USA  
 Sales 630-553-6924  
 Fax: 630-553-9025

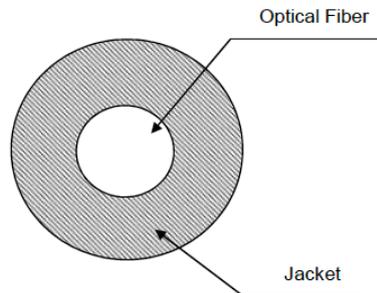
No

1. Scope  
This specification covers basic requirements for the structure and optical performances of MH4001.
2. Structure

Table 1

Item		Specification			
		Unit	Min.	Typ.	Max.
Optical Fiber	Core Material	—	Polymethyl-Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Polymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Refractive Index Profile	—	Step Index		
	Numerical Aperture	—	0.3		
	Core Diameter	μm	920	980	1,040
	Cladding Diameter	μm	940	1,000	1,060
Jacket	Material	—	Polyethylene		
	Color	—	Black		
	Diameter	mm	2.13	2.20	2.27
Approximate Weight		g/m	4		
Indication on the Jacket		—	●●●▲ ESKA MEGA ●●● :Pink		

Sectional View



No

## 3. Performances

Table 2

MH-4001

Item		Acceptance Criterion and/or [ Test Condition ]	Specification			
			Unit	Min.	Typ.	Max.
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration [ in a Dry Atmosphere ]	°C	-40	-	+85
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties* [ in a Dry Atmosphere ]	°C	-40	-	+85
		No Deterioration in Optical Properties** [ under 95%RH condition ]	°C	-	-	+75
Optical Properties	Transmission Loss [ 650nm Collimated Light ]	[ 25°C 50%RH ]	dB/km	-	-	160
		[ Operation Temperature ]	dB/km	-	-	180
	Bandwidth	-3dB bandwidth Launch NA = 0.3 Length 50m@650nm	MHz	170	200	-
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment $\leq 0.5$ dB [ A Quarter Bend ]	mm	25	-	-
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment $\leq 1$ dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]***	Times	5,000	-	-
	Tensile Strength	Tensile Force at 5% Elongation; in Conformity to the JIS C 6861 ]	N	70	-	-
	Twisting Endurance	Loss Increment $\leq 1$ dB [ Sample Length : 1m Tensile Force : 4.9N ]	Times	5	-	-
	Impact Endurance	Loss Increment $\leq 1$ dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	N·m	0.4	-	-

All tests are carried out under temperature of 25°C unless otherwise specified.

\* Attenuation change shall be within +/- 10% after 1,000 hours.

\*\* Attenuation change shall be within +/- 10% after 1,000 hours, except that due to absorbed water.

\*\*\* Bend Angle +/-90°, Bend Radius 15mm, Tension 500g

The specifications is subject to change without notice.

The information contained herein is presented as guide for the product selection.

Please contact our business department for the issue of an official specification sheet.

**Specifications  
for Plastic Optical Fiber**

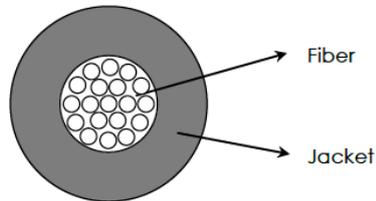
**Multi-core POF  
SMCK-1000P**

Issued on : April 1, 2013

Issued by : Asahi Kasei E-Materials Corporation  
Plastic Optical Fiber  
Marketing & Development Gr

## 1, STRUCTURE

ITEM	UNIT	Specifications
Core Material		PMMA
Clad Material		Fluorinated Polymer
Fiber Diameter	μm	1000 ± 80
Core Number		19
NA		0.6
Jacket Material		PE
Jacket Diameter	μm	2200 ± 70
Jacket Color		Black



## 2, PROPERTIES

ITEM	UNIT	Specifications	
Application Temperature Range	°C	-55 ~ 85	
Attenuation	dB/m	≤ 0.5	*1
Tensile Strength at Break Point	N	≥ 80	*2
Minimum Bending Radius	mm	2	*3

## 3, RoHS certification

The product does not contain RoHS 2 hazardous substances, Cadmium, Lead, Mercury, Chrome VI, PBB, PBDE, HBCDD, DEHP, DBP and BBP intentionally.

### Sample conditions

Temperature: T = 23°C  
 Humidity: RH = 50%  
 Storage time: t = 200h

\*1 : Light Source : LED (Peak Wavelength = 657nm), 20-2m Cut-back Method

\*2 : Interval between grippers = 100 mm, Tensile Speed = 100mm/min

\*3 : L = 2m, 90 degree bending at the middle of fiber

Light Source : LED (Peak Wavelength = 657nm)  
 Transmission Rate ≥ 90%

\*\*\*\* Menu \*\*\*\*

[日本語ページ](#)

[Graviton Incorporated  
Top Page](#)

[Contact Information](#)

[O to E Top Page](#)

[Selection Guide](#)

\* O to E for Visible  
Light  
(Max NA = 0.2, 0.25)

- [SPD-1\\_650nm](#)
- [SPD-1\\_850nm](#)

- [SPD-2\\_650nm](#)
- [SPD-2\\_850nm](#)

- [SPD-3](#)
- [SPD-4](#)

\* O to E for Visible  
Light  
(Max NA = 0.5)

- [SPA-2\\_650nm](#)
- [SPA-3](#)
- [SPA-4](#)

\* O to E for Visible  
Light  
(High Sensitivity  
Models)

- [SPS-1](#)
- [SPS-2](#)

\* O to E for NIR Light

- [LPD-1](#)
- [LPD-2](#)
- [LPS-1](#)
- [LPS-2](#)

[Frequency](#)

**SPD-2\_650nm & SPD-2\_850nm**  
(Max Core = 1mm, Max NA = 0.25, 1,000V/W@658nm or 850nm, DC to 1.2GHz)



**Features**

- \* For High Speed POF,  
Max core = 1mm, Max NA = 0.5
- \* High Sensitivity, 1000V/W
- \* Wide Bandwidth, from DC up to 1.2GHz
- \* 103mm x 44mm x 21mm, 130 grams
- \* JPY 290,000 for direct sales  
(Excluded tax and shipping cost)

SPD-2 is a O to E converter configured by a silicon PIN photodetector, Graviton's original lens system, and TIA circuitry. The lens system incarnates large detection diameter of 1.0mm. SPD-2 is suitable for instrumentation of fiber communication systems using a large core POF. SPD-2\_650nm is tuned for the wavelength of 658nm, and SPD-2\_850nm is for 850nm. [Caution that the frequency characteristics compensation of photodetector is different between SPD-2\\_650nm and SPD-2\\_850nm.](#)

\* Specifications of SPD-2\_650nm & SPD-2\_850nm

Model Name	SPD-2_650nm	SPD-2_850nm
Reference Wavelength	658nm	850nm
Wavelength Range	380 to 1000nm	380 to 1000nm
Acceptable Maximum Core Diameter	φ 1.0mm	φ 1.0mm
Acceptable NA Range	0.25 or less	0.25 or less
Optical Input Connector	FC receptacle	FC receptacle
Photodetector Type	Si PIN PD	Si PIN PD
Active diameter of Photodetector	φ 0.4mm	φ 0.4mm
Conversion Gain (at reference wavelength)	1,000V/W	1,000V/W
Output Saturation Optical Input Power (Ref. wavelength)	-4dBm	-4dBm
Conversion Bandwidth	DC to 1.2GHz	DC to 1.2GHz
Output Noise Level	1.9mVrms or less	1.9mVrms or less
Noise Equivalent Optical Power (at reference wavelength)	-27.3dBm or less	-27.3dBm or less
Electrical Output Connector	BNC plug	BNC plug
Output Impedance	50 ohms	50 ohms
Output Offset Voltage	0.5mV or less	0.5mV or less
DC Power Connector	LEMO 0S-4P	LEMO 0S-4P
Supply Voltage	DC±15V	DC±15V

[Characteristics dependence on the wavelength](#)

[Options and Accesories](#)

• [Download \(pdf\)](#)

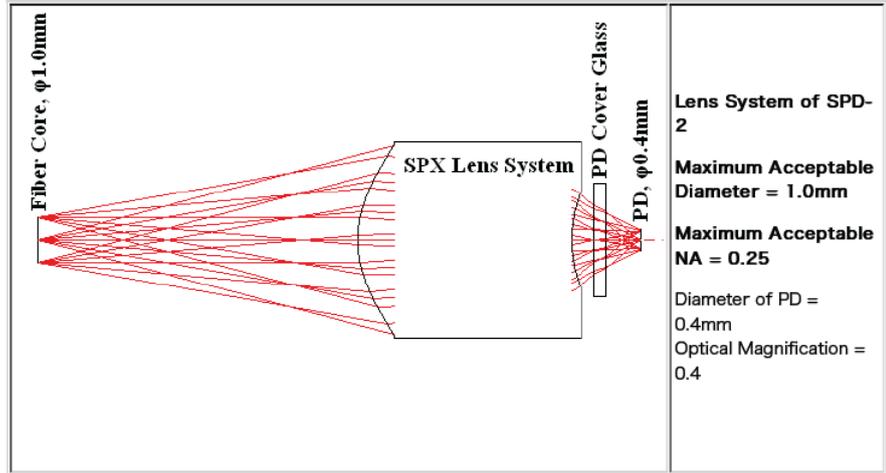
[O to E Converter Lineup Catalog \(1.990KB\)](#)

[O to E Converter Instruction Manual \(2.597KB\)](#)

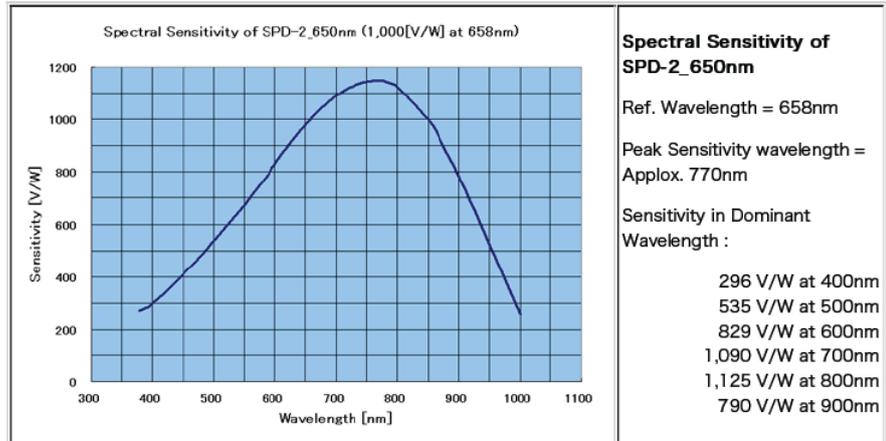
<b>Supply Current</b>	+150mA/-50mA	+150mA/-50mA
<b>Dimensions</b>	103 x 44 x 21mm	103 x 44 x 21mm
<b>Weight</b>	Approx. 130g	Approx. 130g

\*\* Optical input connector, electrical output connector is that of the standard model.  
 \*\* Other types of connectors are available as a customer's option.

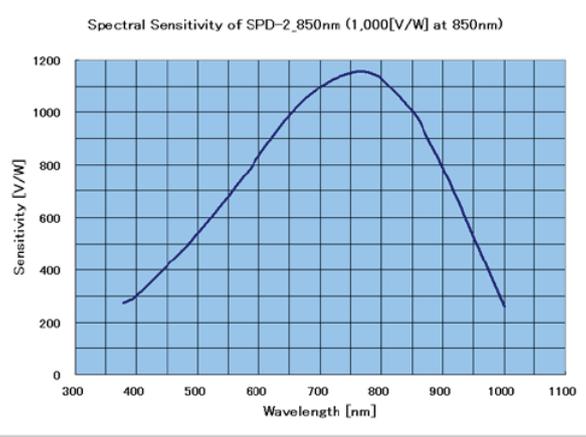
• **Lens System**



• **Spectral Sensitivity (by Calculation)**



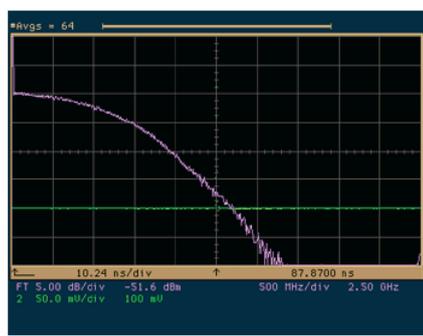
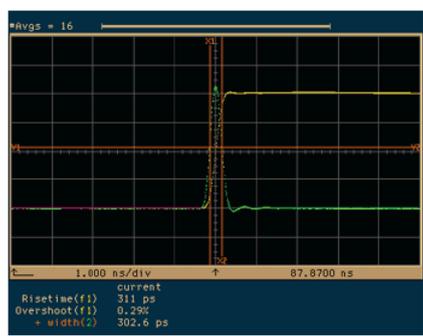
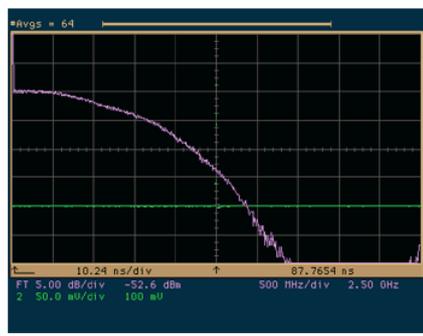
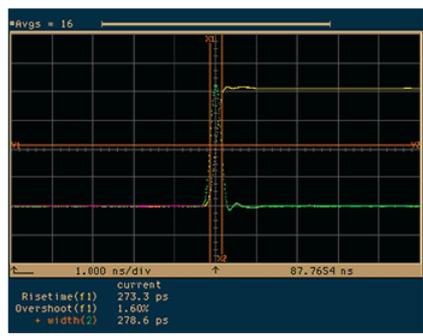
**Spectral Sensitivity of SPD-2\_850nm**  
 Ref. Wavelength = 850nm  
 Peak Sensitivity wavelength =



Approx. 770nm  
 Sensitivity in Dominant Wavelength :

- 298 V/W at 400nm
- 539 V/W at 500nm
- 834 V/W at 600nm
- 1,098 V/W at 700nm
- 1,133 V/W at 800nm
- 795 V/W at 900nm

**\* Step Response & Frequency Characteristics (Examples)**



# Coaxial Amplifier

## ZFL-2500+

50Ω Medium Power 500 to 2500 MHz

### Features

- wideband, 500 to 2500 MHz
- high gain, 31 dB typ.
- protected by US Patent, 6,943,629

### Applications

- spread-spectrum and optical communications
- cellular base stations
- GPS
- test instrumentation



Generic photo used for illustration purposes only

CASE STYLE: Y460

Connectors	Model
SMA	ZFL-2500+
BRACKET (OPTION "B")	

**+RoHS Compliant**

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

### Amplifier Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		GAIN (dB)		MAXIMUM POWER (dBm)		DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Typ.		DC POWER	
	$f_L$	$f_H$	Min.	Flatness Max.	Output (1 dB Compr.)	Input (no damage)	NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In	Out	Volt (V) Nom.	Current (mA) Max.
ZFL-2500+	500	2500	28	±1.5	+15	+5	8.0	+27	2.5	2.5	5	220

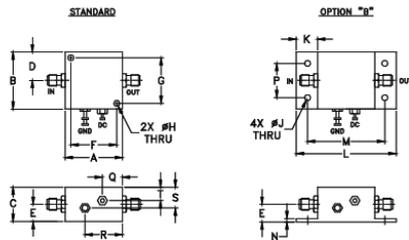
Open load is not recommended, potentially can cause damage.  
With no load derate max input power by 20 dB

### Maximum Ratings

Operating Temperature	-20°C to 65°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	+6V Max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

### Outline Drawing



### Outline Dimensions (Inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	wt.
1.25	1.25	.75	.63	.36	1.000	1.000	.125	.125	.46	2.18	1.688	.06	.750	.50	.80	.45	.29	grams
31.75	31.75	19.05	16.00	9.14	25.40	25.40	3.18	3.18	11.68	55.37	42.88	1.52	19.05	12.70	20.32	11.43	7.37	38

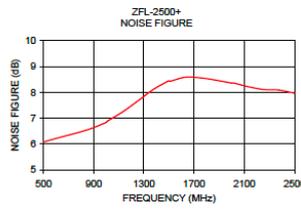
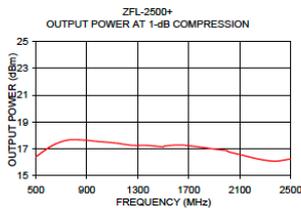
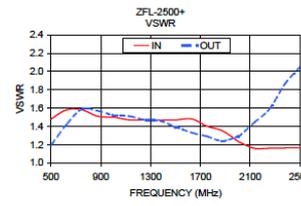
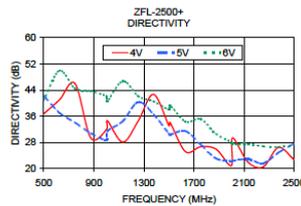
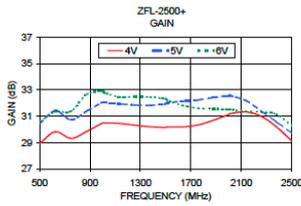
### Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp)

**Mini-Circuits**  
www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. D  
M161107  
ZFL-2500+  
190428  
Page 1 of 2

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (-1) 5V		NOISE FIGURE (dB)	POUT at 1dB COMPR. (dBm)
	4V	5V	6V	4V	5V	6V	IN	OUT		
500.00	28.92	30.43	30.59	36.73	42.23	40.95	1.48	1.19	6.08	16.40
625.00	29.82	31.41	31.34	41.02	37.01	49.91	1.58	1.42	6.25	17.22
750.00	29.32	30.73	31.38	45.97	34.04	44.45	1.58	1.59	6.41	17.65
875.00	29.85	31.40	32.68	29.38	30.82	43.66	1.51	1.57	6.59	17.65
1000.00	30.49	32.08	32.93	31.84	28.74	42.15	1.50	1.52	6.84	17.53
1010.00	30.48	32.06	32.83	34.51	31.45	40.63	1.50	1.52	6.89	17.53
1192.50	30.45	31.95	32.47	28.07	34.48	46.73	1.47	1.51	7.25	17.42
1255.00	30.32	31.86	32.49	34.55	40.35	42.13	1.47	1.47	7.68	17.26
1377.50	30.20	31.84	32.47	42.68	36.54	40.51	1.47	1.46	8.12	17.25
1500.00	30.15	31.95	32.34	33.08	30.64	38.03	1.47	1.39	8.45	17.15
1510.00	30.19	32.05	32.26	34.08	30.33	39.34	1.47	1.39	8.43	17.21
1632.50	30.19	32.15	31.83	25.14	31.44	34.32	1.48	1.33	8.59	17.28
1755.00	30.33	32.24	31.62	26.65	27.32	35.09	1.40	1.29	8.56	17.17
1877.50	30.69	32.43	31.56	25.90	23.05	30.59	1.35	1.24	8.47	17.01
2000.00	31.13	32.56	31.53	20.85	22.18	28.08	1.24	1.29	8.36	16.86
2010.00	31.20	32.56	31.52	29.35	22.29	27.47	1.23	1.29	8.37	16.78
2132.00	31.33	32.22	31.38	21.96	22.88	27.51	1.16	1.44	8.22	16.50
2255.00	31.01	31.43	31.32	20.48	21.56	26.74	1.16	1.59	8.11	16.22
2377.00	30.21	30.58	31.15	26.43	24.85	26.58	1.16	1.86	8.09	16.08
2500.00	29.13	29.72	30.29	22.69	27.61	27.12	1.16	2.05	7.97	16.24



Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



## ANEXO II: CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS

En este anexo se muestran los resultados de las caracterizaciones de las fibras (ya resumidos en el apartado 3.1.1.2) de un modo más extenso. Para estas medidas se ha empleado también el VNA. Si bien en dicho apartado se mostraba el resultado obtenido en las fibras de 50 metros después de haberse normalizado al máximo para cada fibra, resulta también interesante analizar el resultado obtenido sin la normalización, mostrado en la Figura II.1.

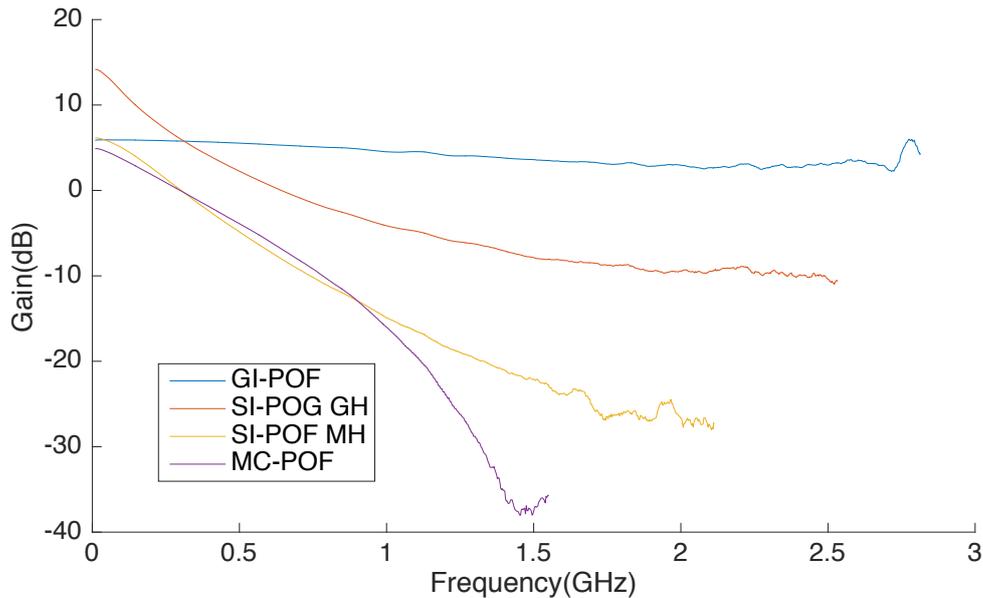


Figura II.1. Respuesta frecuencial fibras 50 metros sin normalización

Las fibras MC-POF, SI-POF MH y GI-POF presentan una atenuación similar como se observa en la Figura II.1. Como la GI-POF tiene un espectro mucho más plano nos permite obtener resultados muy por encima que los obtenidos con las otras fibras. Por otro lado la SI-POF GH presenta menor atenuación, lo que supone que se obtengan mejores resultados con ella que con la SI-POF MH o la MC-POF.

Por otro lado, se quiere mostrar el efecto de la distancia en la respuesta frecuencial de la fibra óptica. Se han empleado fibras GI-POF de diferentes distancias para compararse entre sí como se muestra en la Figura II.2. La fibra más corta presenta la respuesta más plana en frecuencia dado que cuanto mayor es la longitud de la fibra mayor es la diferencia entre los caminos recorridos por los distintos modos y por tanto mayor es la dispersión. Además se aprecia una clara dependencia de la potencia recibida con la distancia. Cuanto más larga es la fibra mayor es la atenuación que sufre la luz a lo largo de la misma. Sin embargo, la fibra de 75 metros presenta menor atenuación que la fibra de 60 metros que como vemos presenta un potencia recibida mucho menor. Esto se debe a la variabilidad en las prestaciones de las fibras de plástico, en este caso posiblemente fruto del proceso de fabricación.

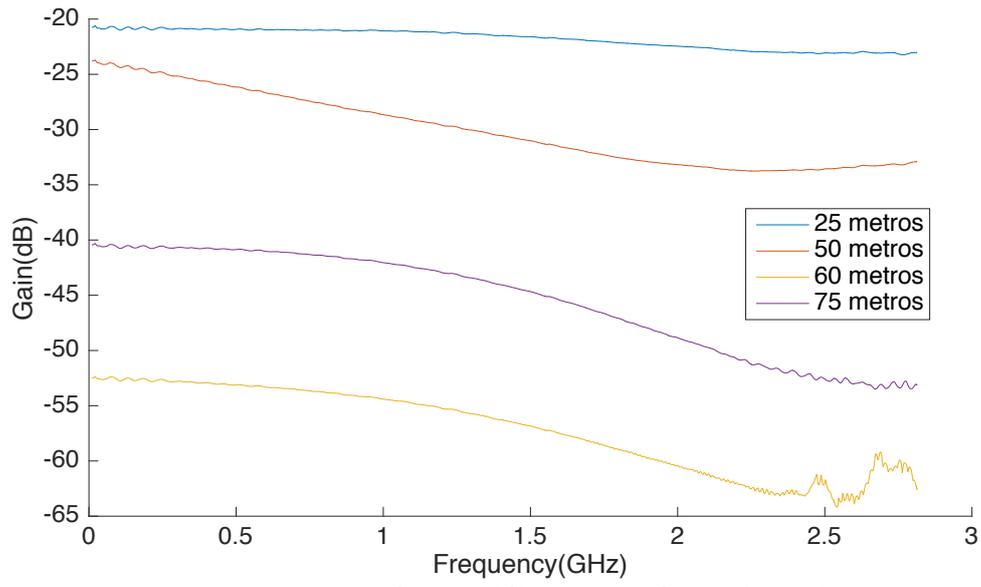


Figura II.2. Respuesta frecuencial fibras GI-POF diferentes longitudes

## ANEXO III: ELECCIÓN DEL AMPLIFICADOR DE RF

Para una justificación más rigurosa de la selección del amplificador, vamos a ver como se comportan los amplificadores con el sistema completo incluyendo todos los tipos de fibra. Veremos primero como se comporta cada amplificador con cada tipo de fibra (Figura III.1) y después para cada fibra cual es el mejor amplificador (Figura III.2).

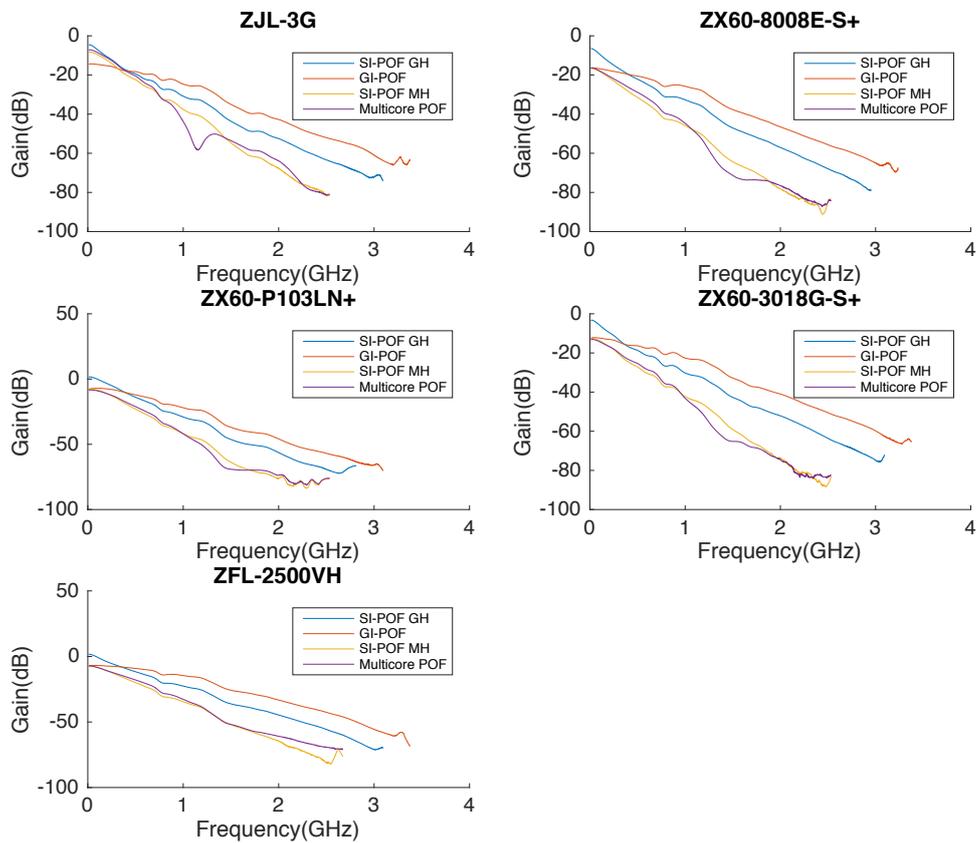


Figura III.1. Respuesta frecuencial del sistema óptico completo con cada amplificador para cada tipo de fibra

Como vemos para todos los amplificadores la fibra GI-POF da mejores resultados que las demás. Después le sigue la SI-POF GH; la SI-POF MH y la Multicore dan peores resultados. Estos resultados eran esperables dado que coinciden con los que habíamos analizado de la caracterización de las fibras independientemente.

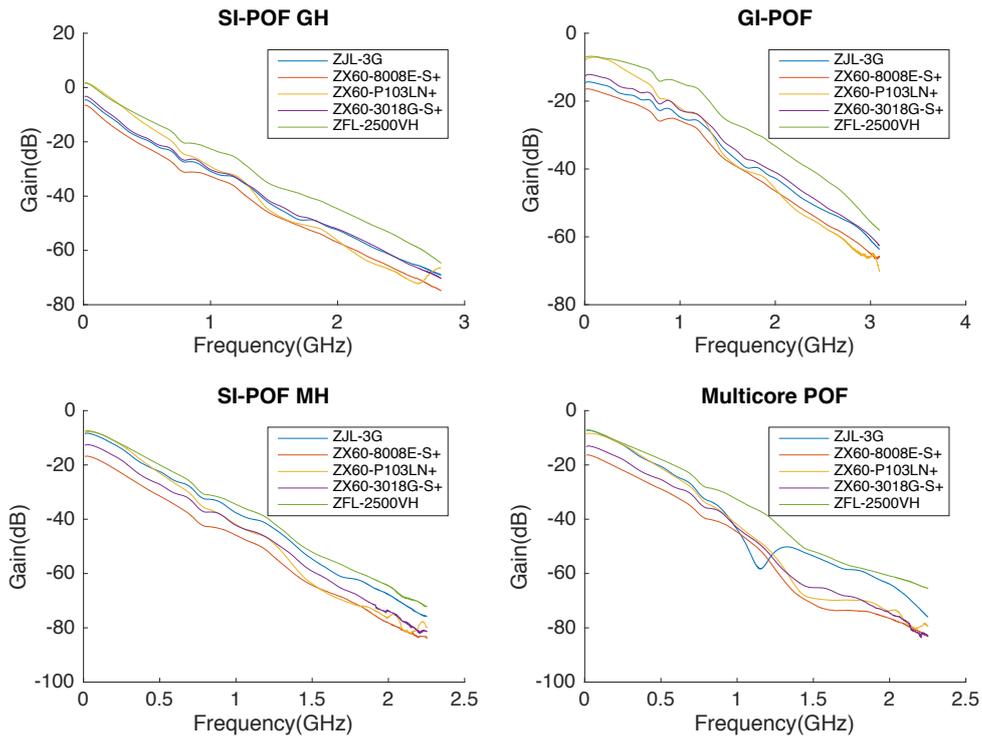


Figura III.2. Respuesta frecuencial del sistema óptico completo con cada fibra para cada amplificador

Podemos observar que para todos los tipos de fibra el amplificador ZFL-2500VH da mejores resultados que los demás, especialmente con la fibra de gradiente de índice. Por este motivo no cabe duda que el amplificador a seleccionar para el montaje será el ZFL-2500VH.

## ANEXO IV: ECUALIZACIÓN EN EL RECEPTOR: DFE

Tal y como se ha dicho en el apartado 3.3, en el procesado de la señal recibida se ha empleado un ecualizador DFE (Decision Feedback Equalizer) para la mejora de la señal recibida con el objetivo de aumentar la tasa de transmisión. Un DFE es un ecualizador no lineal que emplea los símbolos anteriores para eliminar la interferencia intersimbólica (ISI) del símbolo que está siendo demodulado causada en parte por dichos símbolos anteriores. En la Figura IV.1 se muestra el diagrama de bloques general de un DFE.

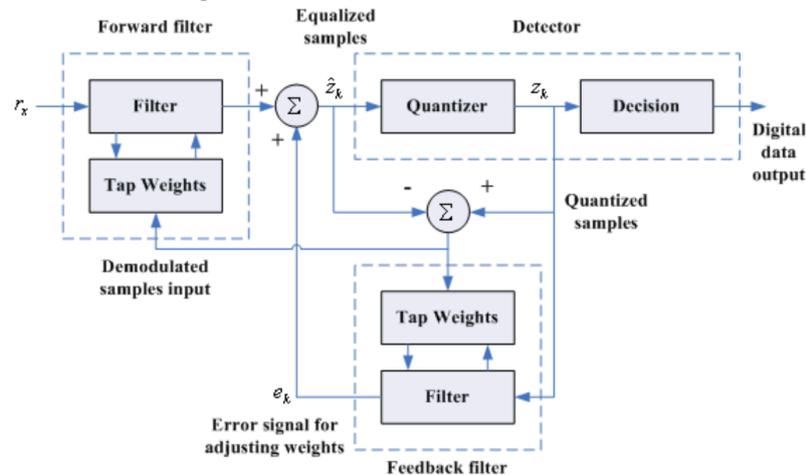


Figura IV.1. Diagrama de bloques de un DFE

Un DFE se compone de dos filtros: *Forward* y *Feedback* (o *Backward*). La idea básica detrás de este sistema es que sabiendo los valores de los símbolos previamente detectados, la ISI provocada por estos símbolos en los siguientes puede ser eliminada a la salida del filtro de *Forward* restando (realimentando) los símbolos pasados multiplicados por ciertos valores (pesos). El número de 'Taps' de cada filtro indica el número de símbolos previos que se emplean para eliminar la ISI del símbolo actual. Este valor puede ser modificado según las necesidades del sistema. En principio a mayor número de *Taps* mejor será la ecualización pero también aumentará el tiempo en ecualizar todos los símbolos (mayor retardo).

En nuestro sistema el DFE empleado consta de treinta *Taps* en el filtro de *Forward* y veinte *Taps* en filtro de *Backward*. Con estos valores se logra una corrección muy apreciable en los símbolos recibidos. En la Figura IV.2 se muestra una imagen de los símbolos obtenidos antes y después de la ecualización con el DFE. El DFE es capaz de corregir significativamente los símbolos recibidos mejorando el BER y, de este modo, permitiendo alcanzar tasas de transmisión más elevadas.

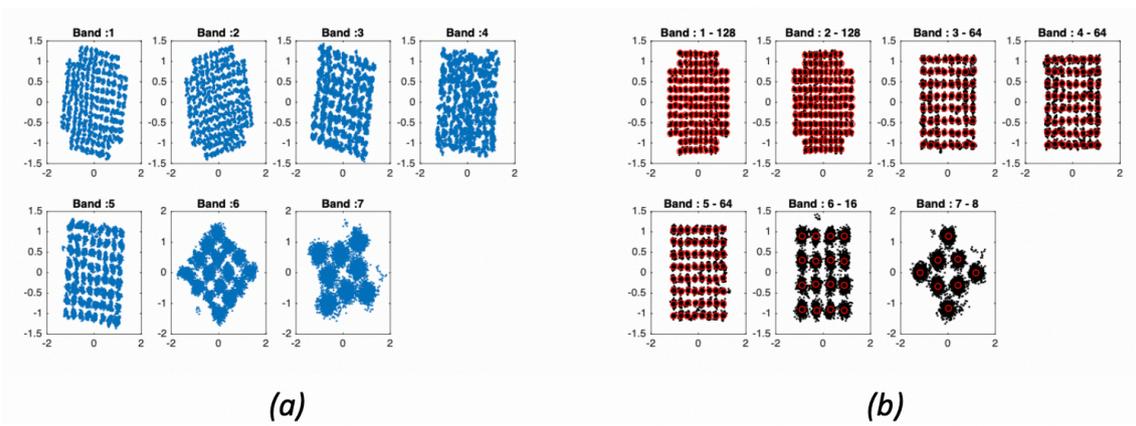


Figura IV.2. Símbolos recibidos antes (a) y después (corregidos) (b) del DFE