



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Caracterización experimental de las propiedades de transmisión de fibras de plástico de salto de índice para longitud de onda de 520 nm

Experimental characterization of the transmission properties of Step-Index Plastic Optical Fibers with a wavelength of 520 nm

Autora

María Mazo Bañares

Directora

M^a Ángeles Losada Binué

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2021

Agradecimientos

A la Cátedra Mobility City de la Universidad de Zaragoza por la concesión de una beca de apoyo a este Trabajo de Fin de Grado.

Al grupo de POF, en especial a M^g Ángeles Losada y Alicia López, por su ayuda durante la realización de este trabajo y a mis compañeros del laboratorio que han sido un gran apoyo.

A mis padres, familia y amigos por su apoyo incondicional durante estos años de carrera.

Caracterización experimental de las propiedades de transmisión de fibras de plástico de salto de índice para longitud de onda de 520 nm

RESUMEN

La finalidad del proyecto, desarrollado dentro del equipo de trabajo de fibras ópticas de plástico (*Plastic Optical Fibers*, POFs) perteneciente al Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A, es avanzar en la aplicación de la tecnología asociada a las fibras ópticas de plástico en redes de comunicaciones de corto alcance, habituales tanto en sistemas de transporte como en el hogar. Este trabajo se centra en la caracterización experimental de las propiedades de transmisión de tres fibras de diferentes aperturas numéricas de polimetil-metacrilato (PMMA) de núcleo de 1 mm de diámetro y perfil de salto de índice (SI-POF) en función de la longitud utilizando una fuente óptica con longitud de onda de emisión 520 nm (luz verde).

Para llevar a cabo la caracterización de las SI-POFs se define un protocolo experimental basado en el método de corte, que permite analizar las propiedades de la fibra en función de su longitud manteniendo invariables las condiciones de inyección. Se obtienen medidas de potencia óptica recibida, patrón de campo lejano (*Far-Field-Pattern*, FFP) y respuestas en frecuencia. Además, se mide la tasa de error de bit (*Bit-Error-Rate*, BER) en función de la tasa de transmisión para verificar las prestaciones de la fibra como parte de un sistema completo. Adicionalmente, se estudian las diferencias en la respuesta en frecuencia para dos longitudes de onda diferentes: 520 nm y 650 nm, diseñando un experimento de control para realizar las medidas en las mismas condiciones experimentales.

Los resultados obtenidos confirman la menor atenuación de todas las fibras analizadas en 520 nm, pero también sugieren que existe una mayor dispersión modal en esta longitud de onda. La reducción de la capacidad derivada del aumento en la dispersión es insignificante para fibras largas y comparable a la variabilidad en fibras cortas. De esta forma, este efecto no supone un obstáculo en el uso de fuentes que emiten en la región del verde para el despliegue de enlaces POF en distintos escenarios donde se requiere un mayor balance de potencias.

Experimental characterization of the transmission properties of Step-Index Plastic Optical Fibers with a wavelength of 520 nm

ABSTRACT

The aim of the project, developed within the Plastic Optical Fibers (POFs) work team belonging to the Photonic Technologies Group (GTF) of the I3A, is to advance in the application application of POF technology in short-range communication networks, frequent both in transport systems and at home. This work focuses on the experimental characterization of the transmission properties of three fibers with different numerical apertures (NA) of polymethyl-methacrylate (PMMA) of 1 mm diameter core and step-index profile (SI-POF) as a function of length using an optical source with 520 nm (green light) as emission wavelength.

To characterize the SI-POFs, an experimental protocol based on the cut-back method is designed to analyze the properties of the fiber under the same injection conditions. Received optical power, Far-Field-Pattern (FFP) and frequency response measurements are obtained as a function of the fiber length. Measurements of Bit-Error-Rate (BER) versus data rate allow to assess fiber capabilities as part of a communication system. In addition, the differences in frequency response for two different wavelengths, 520 nm and 650 nm, are studied, performing a control experiment devised to maintain the same experimental conditions.

The results confirm that the attenuation is lower at 520 nm for all the tested fibers, but also suggest a higher modal dispersion at this wavelength. The reduction in capacity due to the increase in dispersion is, however, insignificant for long fibers, and comparable to variability for short fibers. Thus, it does not hinder the use of green light sources to deploy POF links in scenarios where a high power budget is needed.

Índice de Contenidos

Índice de Acrónimos	19
1 Introducción	21
2 Fibras ópticas de plástico	25
2.1 Propiedades de transmisión	26
2.1.1 Atenuación	27
2.1.2 Dispersión	28
3 Metodología experimental	31
3.1 Sistema experimental	31
3.2 Experimentos previos	34
3.2.1 Selección de parámetros de los dispositivos activos	34
3.2.2 Selección de fibras	37
3.2.3 Parámetros de trabajo	39
3.3 Protocolo de medida	40
3.4 Obtención de funciones y parámetros	42
3.4.1 Potencia óptica recibida	42
3.4.2 Respuesta en frecuencia	43
3.4.3 Distribución angular de intensidad	44
3.4.4 BER y diagramas de ojo	47
4 Comparación de las propiedades de transmisión para SI-POFs de distintas aperturas	51
4.1 EAF	51
4.2 Respuesta en frecuencia	52
4.3 BER	54
4.4 Comparación de resultados para la fibra GH en 520 nm y 650 nm	54
4.5 Parámetros de transmisión	57

5	Comparación de las respuestas en frecuencia en 520 nm y 650 nm	61
5.1	Metodología experimental	61
5.2	Respuestas en frecuencia obtenidas con el SPD	62
5.3	Respuestas en frecuencia obtenidas con el SPA	63
5.4	Conclusiones	64
6	Conclusiones y líneas futuras	67
6.1	Conclusiones	67
6.2	Líneas futuras	69
	Bibliografía	71
	Anexos	75
I	Preparación y verificación de fibras	77
I.1	Preparación de los extremos de POF	77
I.2	Verificación de fibras	79
II	Sistemas experimentales	81
II.1	Montaje experimental para fibra dúplex	81
II.2	Medida de patrón de campo lejano (FFP)	82
II.3	Parámetro de transmisión S_{21}	83
II.4	BER vs. Tasa de transmisión	85
II.5	Medida de patrón de campo cercano (NFP)	87
III	Caracterización de dispositivos	89
III.1	Caracterización de las fuentes de emisión	89
III.1.1	Curva Intensidad-Potencia	89
III.2	Caracterización de los detectores	90
III.2.1	Curva Potencia-Voltaje	90
III.2.2	Distorsión armónica (THD)	91
III.2.3	Respuesta en frecuencia	92
III.3	Caracterización de acopladores	93
IV	Protocolos de medida	95
IV.1	Protocolo de medida MH-4001	95
IV.2	Protocolo de medida GH-4002	97
IV.3	Protocolo de medida BH-4001	99

V Series de medidas	101
V.1 Serie de medidas GH-4002	101
V.2 Serie de medidas BH-4001	105
VI Código desarrollado	111
VII Hojas de características	135
VIII Repercusión	199

Índice de Figuras

Figura 2.1	Clasificación de POF.	26
Figura 2.2	Atenuación espectral para POF con núcleo de PMMA.	27
Figura 2.3	Transmisión de los modos a través de distintos tipos de POF.	28
Figura 2.4	Cálculo del ancho de banda a -3 dB.	29
Figura 2.5	Comparación de productos BL para varios tipos de fibra óptica.	29
Figura 3.1	Sistema experimental para obtener: (a) potencia óptica recibida; (b) imágenes FFP; (c) parámetro de transmisión S_{21} ; (d) BER; (e) diagramas de ojo.	33
Figura 3.2	Parámetro de transmisión S_{21} para distintas intensidades de polarización para los dos detectores: (a) SPD; (b) SPA.	35
Figura 3.3	BER vs. Tasa de transmisión para distintas intensidades de polarización para los dos detectores: (a) SPD; (b) SPA.	35
Figura 3.4	Parámetros S_{21} de las fuentes de transmisión para la intensidad óptima de bias y los dos detectores: (a) SPD; (b) SPA.	36
Figura 3.5	Sección de las fibras analizadas.	38
Figura 3.6	BER vs. Tasa de transmisión, fibras largas.	38
Figura 3.7	Protocolo de medida.	41
Figura 3.8	Potencia óptica recibida vs. Longitud de la fibra, MH.	42
Figura 3.9	Fibra MH: (a) parámetro S_{21} ; (b) respuesta en frecuencia.	43
Figura 3.10	Fibra MH: (a) FFP; (b) EAF.	45
Figura 3.11	Fibra MH: SSD y ajuste bisigmoidal.	47
Figura 3.12	Fibra MH: BER vs. Tasa de transmisión.	48
Figura 4.1	EAF en longitudes de fibra seleccionadas: (a) MH; (b) GH; (c) BH.	52
Figura 4.2	Respuesta en frecuencia normalizada en longitudes de fibra seleccionadas: (a) MH; (b) GH; (c) BH.	53

Figura 4.3	BER vs. Tasa de transmisión en longitudes de fibra seleccionadas: (a) MH; (b) GH; (c) BH.	54
Figura 4.4	Fibra GH. Luz verde vs. Luz roja: (a) EAF; (b) respuesta en frecuencia; (c) BER vs. Tasa de transmisión, en longitudes seleccionadas.	55
Figura 4.5	Comparación de los parámetros de transmisión: (a) potencia óptica; (b) anchura de EAF; (c) ancho de banda a 3 dB; (d) Tasa de transmisión para $BER=10^{-6}$	57
Figura 4.6	Distribución de equilibrio para los tres tipos de fibra: (a) LD520 (MH, GH, BH); (b) GH (LD520 vs. LD650).	59
Figura 5.1	Comparación de respuestas en frecuencia SPD: (a) 15 m; (b) 20 m; (c) 50 m.	62
Figura 5.2	Comparación de respuestas en frecuencia SPA: (a) 15 m; (b) 20 m; (c) 50 m.	63
Figura 5.3	Comparación de anchos de banda a -3 dB.	64
Figura 5.4	FFPs para un tramo de fibra GH de 10 metros: (a) LD520; (b) LD650.	66
Figura I.1	Cortadoras específicas para POF.	77
Figura I.2	Peladora Micro-strip para POF.	77
Figura I.3	Proceso de pulido de un extremo de fibra.	78
Figura I.4	Discos de soporte y papeles de lija de espesores diferentes.	78
Figura I.5	Traza del OTDR para 130 metros de fibra MH-4001.	79
Figura I.6	Traza del OTDR para 150 metros de fibra GH-4002 (tramo 1).	79
Figura I.7	Traza del OTDR para 150 metros de fibra GH-4002 (tramo 2).	80
Figura I.8	Traza del OTDR para 100 metros de fibra BH-4001.	80
Figura II.1	Sistema experimental dúplex para obtener: (a) potencia óptica recibida; (b) imágenes FFP; (c) parámetro de transmisión S_{21} ; (d) BER; (e) diagramas de ojo.	81
Figura II.2	Montaje experimental para la medida de FFPs.	82
Figura II.3	Software de control para la medida de FFPs.	83
Figura II.4	Montaje experimental para la medida del parámetro S_{21}	84
Figura II.5	Software de control para la medida del S_{21}	84
Figura II.6	Montaje experimental para la medida de BER.	85
Figura II.7	Software de control para la medida de BER.	86

Figura II.8 Montaje experimental para la medida de NFP.	87
Figura III.1 Curva Intensidad-Potencia LD520.	89
Figura III.2 Curva Intensidad-Potencia LD650.	90
Figura III.3 Curva Potencia-Voltaje LD520 para los dos detectores.	90
Figura III.4 Distorsión armónica LD520-SPD.	91
Figura III.5 Respuesta en frecuencia en función de intensidad de polarización, SPD.	92
Figura III.6 Respuesta en frecuencia en función de potencia de RF, SPD. . .	92
Figura III.7 Respuesta en frecuencia en función de intensidad de polarización, SPA.	93
Figura III.8 Respuesta en frecuencia en función de potencia de RF, SPA. . .	93
Figura V.1 Fibra GH: respuesta en frecuencia (rojo y verde).	101
Figura V.2 Fibra GH: variabilidad de los S_{21} para cada longitud de fibra (rojo y verde).	102
Figura V.3 Fibra GH: potencia óptica recibida (rojo y verde).	102
Figura V.4 Fibra GH: EAF (rojo y verde).	103
Figura V.5 Fibra GH: BER vs. Tasa de transmisión (rojo y verde).	103
Figura V.6 Fibra BH: potencia óptica recibida para luz verde.	105
Figura V.7 Fibra BH: respuesta en frecuencia para SPD.	106
Figura V.8 Fibra BH: respuesta en frecuencia para SPA.	106
Figura V.9 Fibra BH: variabilidad de los S_{21} para cada longitud de fibra, SPD.	107
Figura V.10 Fibra BH: variabilidad de los S_{21} para cada longitud de fibra, SPA.	107
Figura V.11 Fibra BH: FFPs para luz verde.	108
Figura V.12 Fibra BH: EAFs para luz verde.	108
Figura V.13 Fibra BH: BER vs. Tasa de transmisión, SPD.	109
Figura V.14 Fibra BH: BER vs. Tasa de transmisión, SPA.	109

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Potencia de saturación de los detectores para 520 nm y 650 nm. . .	37
Tabla 3.2	Características de las fibras analizadas.	37
Tabla 3.3	Parámetros de trabajo de los experimentos de corte.	39
Tabla 3.4	Fibra MH: parámetros de ajuste de SSD a bisigmoide.	46
Tabla 3.5	Fibra MH: diagramas de ojo para una longitud de fibra de 30 m.	49
Tabla 3.6	Fibra MH: diagramas de ojo para una frecuencia de 500 MHz. . .	49
Tabla 4.1	Comparación de diagramas de ojo en 520 nm y 650 nm para BER de 10^{-6}	56
Tabla 4.2	Valores de atenuación para distintas fibras y longitudes de onda.	58
Tabla 4.3	Parámetros de ajuste de SSD a bisigmoide para distintas fibras. .	60
Tabla II.1	Parámetros de configuración óptimos para la medida del S_{21} . . .	85
Tabla III.1	Pérdidas de inserción (dB). Acoplador IF-562.	94
Tabla III.2	Porcentaje de potencia presente en cada puerto. Acoplador IF-562.	94

Índice de Acrónimos

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO	TRADUCCIÓN
B2B	Back-to-Back	Referencia del sistema
BER	Bit-Error-Rate	Tasa de error de bit
EAF	Encircled-Angular-Flux	Flujo angular
FEC	Forward Error Correction	Corrección de errores de avance
FFP	Far-Field-Pattern	Patrón de campo lejano
GI-POF	Graded-Index-POF	Fibra óptica de plástico de gradiente de índice
ISI	Intersymbol Interference	Interferencia intersimbólica
MC-POF	Multicore-POF	Fibra multinúcleo de plástico
MMF	Multi-Mode Fiber	Fibra multi-modo de vidrio
MSI-POF	Multistep-Index-POF	Fibra multisalto de plástico
NA	Numerical Aperture	Apertura numérica
NFP	Near-Field-Pattern	Patrón de campo cercano
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo
PF POF	Perfluorinated POF	Fibra óptica de plástico perfluorinada
PMMA	Polimetil-Metacrilato	Polimetil-Metacrilato
POF	Plastic Optical Fiber	Fibra óptica de plástico
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence	Secuencia binaria pseudoaleatoria
RMSE	Root-Mean-Square Error	Error cuadrático medio
SI-POF	Step-Index-POF	Fibra óptica de plástico de salto de índice
SMF	Single Mode Fiber	Fibra monomodo de vidrio
SSD	Steady State Distribution	Distribución de equilibrio
THD	Total Harmonic Distortion	Distorsión armónica total
VNA	Vector Network Analyzer	Analizador de redes vectoriales

Capítulo 1

Introducción

El subgrupo de fibras ópticas de plástico (*Plastic Optical Fibers*, POFs) perteneciente al Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A, tiene como objetivo fomentar el uso de este tipo de fibras en redes de comunicaciones. Las fibras ópticas de plástico son fibras multi-modo de mucho mayor tamaño y apertura que las fibras de vidrio estándar y cuyos mínimos de atenuación se encuentran en la región visible del espectro [1]. Estas características facilitan su manipulación y permiten su uso con componentes menos precisos y sofisticados abaratando los costes de instalación y mantenimiento. Por otra parte, los materiales plásticos con los que se fabrican presentan mucha mayor difusión que el vidrio de forma que su atenuación y su dispersión modal son mucho mayores. A pesar de la limitación en alcance y capacidad, las POFs se han convertido en estas últimas décadas en un medio de transmisión competitivo para entornos de corto alcance.

La aplicación de las POFs como medio de transmisión de datos a baja velocidad en automóviles fue la primera en desarrollarse, pues en este entorno es crucial, además de su menor coste, su resistencia a curvaturas, vibraciones, etc. [2]. Estas mismas características facilitaron poco después la introducción de las POFs en entornos domésticos para los que ya se comercializan dispositivos que permiten transmitir a 1 Gbps [3, 4]. Más recientemente, las compañías aeronáuticas se interesaron en las POFs para la transmisión de datos dentro de los aviones [5].

Desde su inicio, el grupo desarrolla de forma simultánea varias líneas de investigación dentro del marco de la aplicación de las POFs en comunicaciones: caracterización experimental de fibras, desarrollo de modelos de POF para entornos de simulación de redes ópticas, y diseño y realización de dispositivos y redes basados en POFs. En los últimos años, las necesidades cada vez mayores de las redes domésticas y

en medios de transporte han puesto de manifiesto las limitaciones de la POF por lo que nuestra investigación actual se centra en explorar y desarrollar sistemas POF de mayor alcance y capacidad, estudiando y modelando nuevos tipos de fibra con mayor ancho de banda potencial (fibras de gradiente de índice y de múltiples núcleos), diseñando y evaluando técnicas de transmisión con mayor eficiencia espectral, etc [6, 7, 8, 9, 10].

En esta línea se enmarca el objetivo de este trabajo que es caracterizar las propiedades de las fibras ópticas de plástico de salto de índice (SI-POFs) utilizando un diodo láser que emite en la región espectral del verde. Aunque normalmente se trabaja con fuentes ópticas que emiten en longitudes de onda en la zona del rojo (625 a 700 nm) debido a la mayor variedad de fuentes ópticas comerciales de bajo coste, los mínimos absolutos de atenuación del polimetil-metacrilato (PMMA), que es el material habitual para las POF estándar, se encuentran en torno a 520 nm y 570 nm. Nuestra hipótesis es que, si la ventaja de menor atenuación no se descompensa con menores prestaciones en cuanto a capacidad, se podrá explotar el uso de láseres que emiten en esta región del espectro para la transmisión de información en POF de forma individual o mediante la multiplexación en longitud de onda.

Inicialmente, el uso longitudes de onda fuera de la región del rojo con POFs se limitó a la utilización de transmisores basados en LEDs que aprovechan la menor atenuación en el verde para aumentar el alcance en enlaces de baja capacidad [1]. Más recientemente, se han utilizado diodos láser emitiendo en distintas longitudes de onda para analizar distintos formatos de modulación combinados con multiplexación en longitud de onda [11, 12]. Sin embargo, en las hojas de características de las fibras que proporcionan los fabricantes sólo se dan valores atenuación y ancho de banda en alguna longitud de onda en la región del rojo y no hay estudios completos de caracterización de las propiedades de transmisión de las fibras de plástico en otras longitudes de onda.

En este trabajo, nos hemos centrado en las fibras de PMMA de 1 mm de diámetro de núcleo y de perfil de salto de índice. Aunque se ha demostrado que las fibras con perfil de gradiente de índice (GI-POFs) tienen unos anchos de banda mucho mayores que las SI-POFs por lo que permiten desarrollar sistemas de mayor capacidad, la forma de su curva de atenuación espectral es tal que la atenuación en el verde es mucho mayor que en el rojo por lo que se ha descartado su caracterización [6]. Por otra parte, hemos querido valorar el efecto de la apertura numérica en las propiedades de transmisión por lo que se han seleccionado SI-POFs con distintas aperturas para realizar el análisis. Por ello, hemos seleccionado tres fibras del mismo fabricante (Mitsubishi Rayon Co.,LTD.)

con características diferentes [13]. La MH4001, que es una fibra de baja apertura (0.3); la BH4001 con apertura numérica 0.58 y diseñada especialmente para soportar temperaturas hasta 105° y, por último, la GH4002 que es una fibra estándar de apertura 0.5 con la característica de que se presenta en forma dúplex, es decir, dos fibras unidas en un solo carrete.

Se ha utilizado como fuente un diodo láser que emite en 520 nm y se han obtenido experimentalmente las siguientes funciones características de la fibra: respuesta en frecuencia, distribución angular de intensidad, y tasa de error de bit (*Bit-Error-Rate*, BER) frente a tasa de transmisión, a partir de medidas realizadas con sistemas experimentales previamente desarrollados por el grupo [14, 15, 16]. Para obtener estas medidas en función de la longitud de fibra se han diseñado protocolos específicos que permiten mantener las condiciones de inyección durante todo el experimento y estimar la variabilidad en recepción. Además, para una de las fibras, se han realizado las medidas utilizando dos láseres con longitud de onda de emisión en verde (520 nm) y en rojo (650 nm). Por otra parte, durante el desarrollo del trabajo se diseñaron y realizaron una serie de experimentos enfocados a determinar y cuantificar las diferencias en la respuesta frecuencial de la fibra para ambas longitudes de onda.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten asignar un rango de aplicación a cada tipo de fibra en cuanto a su alcance y a su velocidad de transmisión en un enlace de comunicaciones y, de esta forma, determinar su entorno de aplicación más adecuado. Por otra parte, las medidas obtenidas servirán para ajustar una serie de parámetros de las funciones características que definen un modelo matricial para SI-POFs desarrollado por el grupo de POF para entornos de simulación [17].

La organización de la memoria es la siguiente. En el Capítulo 2, se realiza una introducción de las POFs con especial énfasis en sus propiedades de transmisión. En el Capítulo 3, se presenta la metodología experimental comenzando por la caracterización y selección de los dispositivos activos y fibras. Después, se presenta el protocolo de medida basado en el método de corte (*Cut-Back Method*) y se describe su aplicación en el caso de una fibra concreta para ilustrar la obtención de las funciones características de la misma a partir de las medidas realizadas. En el Capítulo 4, se presentan y analizan los resultados para las fibras estudiadas. En el Capítulo 5, se describen los resultados del experimento para determinar las diferencias en la respuesta en frecuencia según la longitud de onda. Por último, en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones y se proponen las posibles líneas de continuación.

Capítulo 2

Fibras ópticas de plástico

Las fibras ópticas son guías de luz cilíndricas basadas en el fenómeno de la reflexión total para lograr la transmisión de la luz a través de la fibra con muy pocas pérdidas. La reflexión total se produce para determinados ángulos cuando un medio de índice de refracción menor está rodeado de un medio de mayor índice.

Las fibras ópticas se dividen en dos grandes grupos, según su material de fabricación: fibras ópticas de vidrio, con alta capacidad de transmisión en largas distancias, y fibras ópticas de plástico, adecuadas para transmitir en entornos de corto alcance.

Las fibras ópticas de plástico presentan atenuación mayor y capacidad de transmisión menor que las fibras de vidrio. Sin embargo, sus características físicas hacen que este tipo de fibras sean muy deseables para crear redes de comunicaciones en entornos domésticos, industriales y en el interior de medios de transporte. Su mayor tamaño y sus aperturas numéricas más altas hacen que puedan ser utilizadas con dispositivos activos menos exigentes, lo que permite abaratar costes, además de proporcionar mayor seguridad ocular, ya que trabajan en un rango de luz visible.

Estas fibras están compuestas por tres regiones: núcleo, cubierta y revestimiento. El núcleo (*core*) se encuentra en la parte central, es de, aproximadamente, 1 mm de diámetro y normalmente se fabrica de polimetil-metacrilato (PMMA). La cubierta (*cladding*) es una capa muy fina que rodea el núcleo y tiene un índice de refracción de 1.41, por lo que su apertura numérica (NA) suele ser de 0.5. El revestimiento (*jacket*) no influye en la refracción y sirve para proteger la cubierta. Existen también POFs de menor tamaño (250 micras de diámetro) hechas con materiales perfluorinados que presentan una atenuación y dispersión mucho más bajas que les permiten competir con las fibras multi-modo de vidrio (*Multi-Mode Fibers*, MMF) [18]. Por otra parte, las fibras perfluorinadas, por su menor tamaño y sus mínimos de atenuación en el

infrarrojo, pierden algunas de las ventajas de las POFs de PMMA.

Según el perfil de índice, las fibras de plástico de PMMA se dividen en dos tipos: las fibras de índice gradual (GI-POF), cuyo índice de refracción cambia gradualmente a lo largo del núcleo, y las fibras de salto de índice (SI-POF), con un índice constante. En la Figura 2.1 se muestran estas fibras junto a otras POF especializadas en ciertos usos [19]. La MC-POF (*Multicore POF*), compuesta de varios núcleos de menor tamaño, que aporta mejoras en la capacidad de transmisión y la MSI-POF (*Multistep-index POF*), que consigue un perfil de índice gradual a partir de varios saltos de índice, lo cual es interesante para aplicaciones que requieran de una baja apertura numérica.

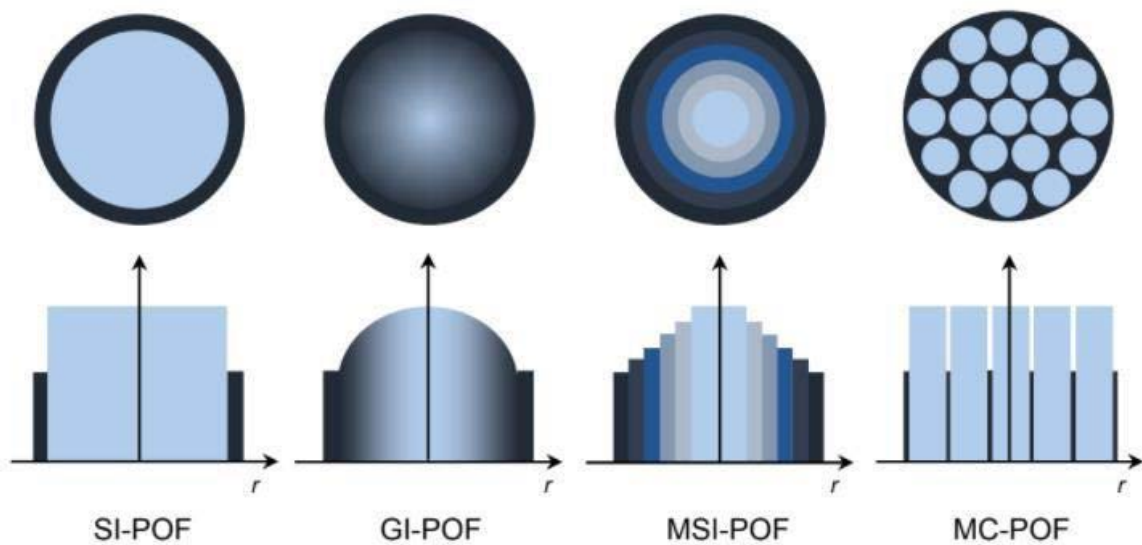


Figura 2.1: Clasificación de POF.

2.1. Propiedades de transmisión

Las fibras de plástico tienen un diámetro mucho mayor que las de vidrio (200-1000 micras frente a 50-62.5 micras) y mayor apertura numérica (0.5 frente a 0.2), por lo que permiten la propagación de millones de modos. Por ello, en lugar de tratar estos modos como valores discretos, en el caso de las POFs, se van a tratar como una distribución continua de potencia en función del ángulo de propagación. Además, el PMMA con el que se fabrican las POFs es mucho más difusivo que el dióxido de silicio con el que se fabrican las fibras de vidrio, lo que se traduce en mayor acoplo modal, es decir, existe mayor intercambio de energía entre modos adyacentes que afecta a las propiedades de transmisión de la fibra. Por esta razón, las medidas tomadas con estas fibras tendrán

una alta variabilidad, ya que son muy sensibles a los cambios en la inyección, a los cambios en la terminación de los extremos, a la forma de conectar los dispositivos activos y a diversos factores externos como la presión sobre la fibra o las curvaturas.

Las propiedades que limitan las prestaciones de la fibra óptica de plástico en un sistema de comunicaciones son dos: la atenuación y la dispersión.

2.1.1. Atenuación

La atenuación es la pérdida de potencia óptica que tiene lugar cuando se realiza la transmisión y varía para cada tipo de fibra. Decae de forma exponencial con la longitud de la fibra, tal como indica la Ecuación 2.1, donde α es el coeficiente de atenuación de la fibra, en dB/km, que expresa la pérdida de potencia óptica por unidad de longitud.

$$P(l) = P(0) * 10^{\frac{-\alpha * l}{10}} \quad (2.1)$$

La atenuación es causada, principalmente, por tres efectos físicos: absorción (impurezas de la fibra causadas en el proceso de fabricación), radiación (causada por curvaturas o imperfecciones) y difusión (*scattering*), que tienen distintas dependencias en función de la longitud de onda. En la Figura 2.2 se muestra la curva de atenuación espectral, que es la variación del coeficiente de atenuación α para fibras de PMMA en función de la longitud de onda [16].

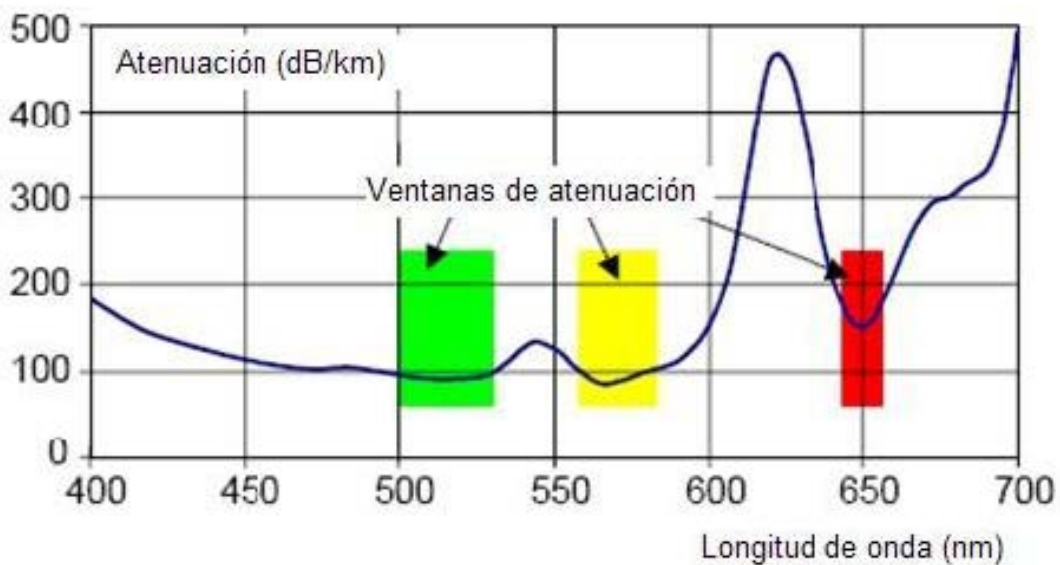


Figura 2.2: Atenuación espectral para POF con núcleo de PMMA.

Las curvas de atenuación para PMMA muestran que las ventanas óptimas de trabajo se encuentran en 520 nm (región del verde), 570 nm (región del amarillo) y 650 nm (región del rojo), dentro del espectro de luz visible. Concretamente, los mínimos de atenuación se encuentran en 520 nm, longitud de onda en la que se centra este trabajo, y en 570 nm.

En las fibras de vidrio, los mínimos de atenuación espectral se encuentran en la región del infrarrojo (longitudes de onda superiores a 1000 nm) y presentan coeficientes de atenuación alrededor de 1000 veces más bajos (0.2 dB/km en 1550 nm). Este hecho determina el uso de las fibras de vidrio en redes de comunicaciones de larga distancia en lugar de las fibras de plástico, que son utilizadas en comunicaciones que requieren un alcance menor. El mínimo de atenuación de las POF perfluorinadas (PF POF) también se encuentra en el infrarrojo, pero su valor es mayor que para fibra de vidrio (0.6 dB/km en 1100 nm).

2.1.2. Dispersión

La dispersión es la diferencia en la velocidad de propagación de las distintas componentes de la potencia óptica (modos, polarizaciones, longitudes de onda, etc.). La dispersión modal, que es la predominante en las POF estándar, se produce cuando los rayos de luz, al transmitirse con distinto ángulo de propagación, recorren caminos diferentes como se ilustra en la Figura 2.3 [16]. En el caso de la SI-POF se observa que los modos de orden más bajo recorren caminos más directos, mientras que los de orden más alto, recorren caminos más largos y llegan al extremo de la fibra con retardos muy diferentes, ensanchando así las señales transmitidas. Por el contrario, el índice gradual de la GI-POF introduce trayectorias que se curvan reduciendo las diferencias entre retardos.

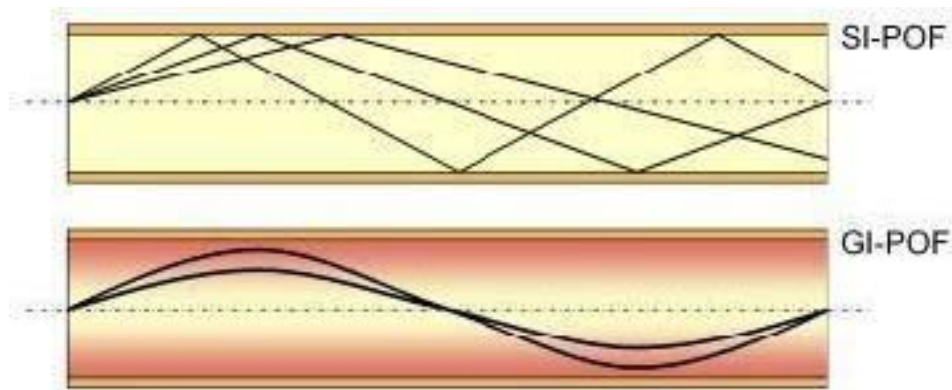


Figura 2.3: Transmisión de los modos a través de distintos tipos de POF.

El ensanchamiento de los pulsos transmitidos, causado por la predominante dispersión modal, hace que la respuesta en frecuencia presente un comportamiento paso bajo que se hace más restrictivo conforme aumenta la longitud de fibra. En la Figura 2.4 se define el ancho de banda a -3 dB, o lo que es lo mismo, la frecuencia para la que la señal cae hasta la mitad de su amplitud máxima [1].

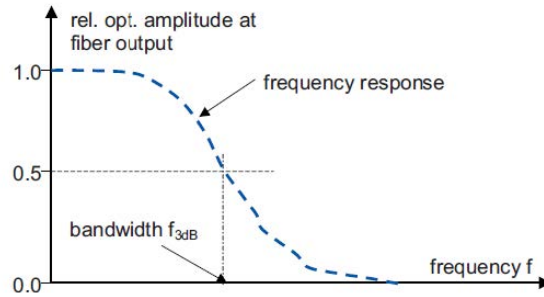


Figura 2.4: Cálculo del ancho de banda a -3 dB.

La capacidad de transmisión de una fibra óptica viene dada por el producto Distancia-Ancho de banda (producto BL), que indica el máximo ancho de banda que es capaz de transmitir una fibra en función de su longitud. Este parámetro varía según las características de fabricación de cada fibra, tal como se muestra en la Figura 2.5. Las fibras monomodo de vidrio (*Single Mode Fibers*, SMF) son las que presentan valores más altos. Las fibras de plástico perfluorinadas con gradiente de índice (PF GI-POF) son comparables a las multi-modo de vidrio. Entre las fibras de plástico de PMMA destaca por sus mejores prestaciones la de gradiente de índice [19]. Por otra parte, con las SI-POFs estándar se puede llegar a transmitir a 4 GHz en 1 m. Este límite puede superarse introduciendo distintos formatos de modulación [10, 12].

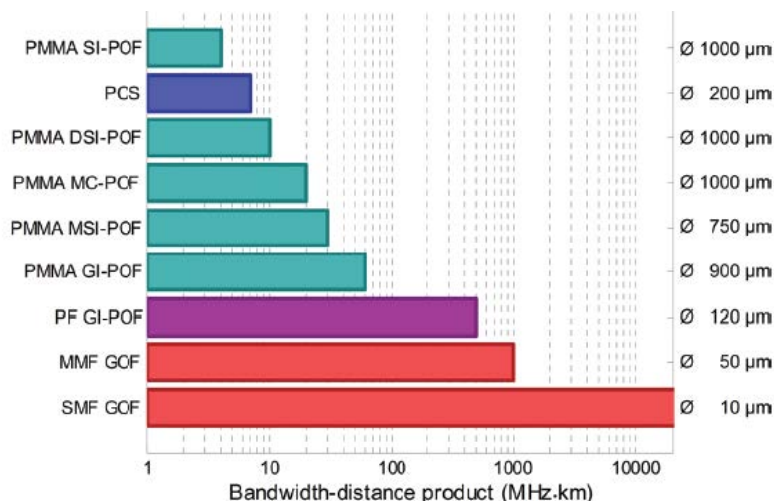


Figura 2.5: Comparación de productos BL para varios tipos de fibra óptica.

Capítulo 3

Metodología experimental

En este capítulo se describe, en primer lugar, el sistema experimental compuesto por los subsistemas individuales necesarios para obtener la potencia óptica recibida, los parámetros de transmisión S_{21} , las imágenes de patrón de campo lejano (*Far-Field-Pattern*, FFP) y la tasa de error de bit (*Bit-Error-Rate*, BER) en función de la tasa de transmisión. En segundo lugar, se describen los experimentos llevados a cabo antes de comenzar la serie de medidas para seleccionar los parámetros óptimos de configuración de los dispositivos activos y la longitud de los carretes de fibra. El protocolo diseñado para obtener las medidas en función de la longitud bajo las mismas condiciones de inyección está basado en el método de corte (*Cut-Back Method*) y se presenta después. Por último, para explicar el procedimiento de obtención de las propiedades de transmisión a partir de las medidas, se presentan los resultados para una de las fibras, la MH-4001. Estas medidas se organizan en distintos apartados: potencia óptica recibida, respuesta en frecuencia, distribución angular de intensidad, BER frente a tasa de transmisión y diagramas de ojo.

3.1. Sistema experimental

El diagrama de la configuración experimental utilizada para llevar a cabo las distintas medidas se muestra en la Figura 3.1. En el esquema aparecen diferenciados distintos bloques. Para el bloque de inyección, representado a la izquierda de la figura, se seleccionó como fuente de emisión óptica el diodo láser LD520P50 (LD520) de Thorlabs, con una potencia nominal de salida de 50 mW y cuya longitud de onda de emisión es 520 nm (verde). El diodo láser se integra en la base LDM9TM, conectado al controlador LDC205, ambos de Thorlabs, que permite mantener constante su temperatura (25 °C), modularlo y fijar la corriente de polarización. El valor óptimo de polarización se

determinó experimentalmente tal y como se describirá en el apartado 3.2.1. Esta base láser se utiliza para construir un enlace óptico modulando directamente el diodo láser utilizando la salida de RF de un analizador de redes vectoriales (VNA E5071C de Agilent) o utilizando la salida de datos de un comprobador de BER (*OptoBERTTM* OPB3200 de Optellent. Inc.). El OptoBERT incorpora un generador de patrones pseudoaleatorios NRZ (*Pseudo Random Binary Sequence*, PRBS) con una longitud de patrón de $10^{23}-1$ (PRBS-23) y un analizador de errores. Tanto para la caracterización en el dominio de la frecuencia como para las medidas de BER (Figura 3.1c y 3.1d respectivamente), el receptor utilizado fue el SPD-2_650 (SPD) de Graviton con una lente de apertura 0.2 y un ancho de banda nominal a 3 dB de 1.2 GHz, pero con buena respuesta hasta los 3 GHz. Su responsividad es de 1 mV/mW a 650 nm y de 0.6 mV/mW a 520 nm.

La potencia óptica recibida se midió directamente utilizando el potenciómetro óptico PM100USB con el sensor S150C, ambos de Thorlabs, conectados a la fibra a través de un conector SMA (Figura 3.1a). Para tomar las medidas de patrón de campo lejano (Figura 3.1b) se colocó el extremo de salida de la fibra a una distancia de 7.5 cm de una pantalla blanca situada en el interior de una caja sellada, para que toda la luz captada por la cámara fuera procedente de la fibra y no del exterior. Utilizando una cámara monocromática de 12 bits (QICAM FAST 1394CCD) se registró la imagen del FFP reflejada en la pantalla [15]. Para reducir el ruido de moteado (*speckle*) se introdujo un sistema de vibración cercano a la punta de la fibra cercana a la pantalla, que no se muestra en la figura por simplificar.

Para obtener el parámetro de transmisión S_{21} la salida RF del SPD se conectó, mediante un conector ST, al VNA (Figura 3.1c) y al OptoBERT para medir las tasas de error de bit (Figura 3.1d). Finalmente, se conectó la salida RF del SPD a un osciloscopio (Infiniium DCA 86100A de Agilent) para medir el voltaje de salida del detector sin modular en la entrada y para registrar diagramas de ojo con la base del láser conectada al OptoBERT, tal como se muestra en la Figura 3.1e. En la toma de voltajes y diagramas de ojo para las longitudes de fibra más cortas, se introdujo un atenuador óptico de 3 dB conectado a la entrada RF del osciloscopio para evitar la saturación del mismo.

Utilizando este mismo montaje se midieron el parámetro de transmisión S_{21} y el BER con otro receptor en algunas condiciones específicas. En este caso, el SPA-2_650 (SPA) de Graviton cuya lente tiene una apertura de 0.48. Su ancho de banda nominal

a 3 dB es de 1 GHz, pero con una caída más abrupta que el SPD. Su responsividad en las longitudes de onda de trabajo es la misma que la del SPD.

El montaje experimental utilizado para el experimento de corte de la fibra dúplex (Anexo II.1) es similar al mostrado en la Figura 3.1. En este caso, se conectaron de forma simultánea dos fuentes ópticas con diferente longitud de onda. Por un lado, el LD520 (verde) descrito anteriormente y por otro, el diodo láser LD650P07 (LD650) de Thorlabs que emite en 650 nm (rojo) con una potencia nominal de 7 mW, instalado en la base LDM9TM con el controlador LDC200. A la hora de tomar las medidas de BER y los diagramas de ojo, se ha introducido un atenuador óptico de 3 dB en la entrada RF del LD650 para limitar la señal introducida. Esto no es necesario en el caso del LD520 ya que tiene un mayor rango de intensidad de polarización (ver curvas Intensidad-Potencia de ambas fuentes, Anexo III).

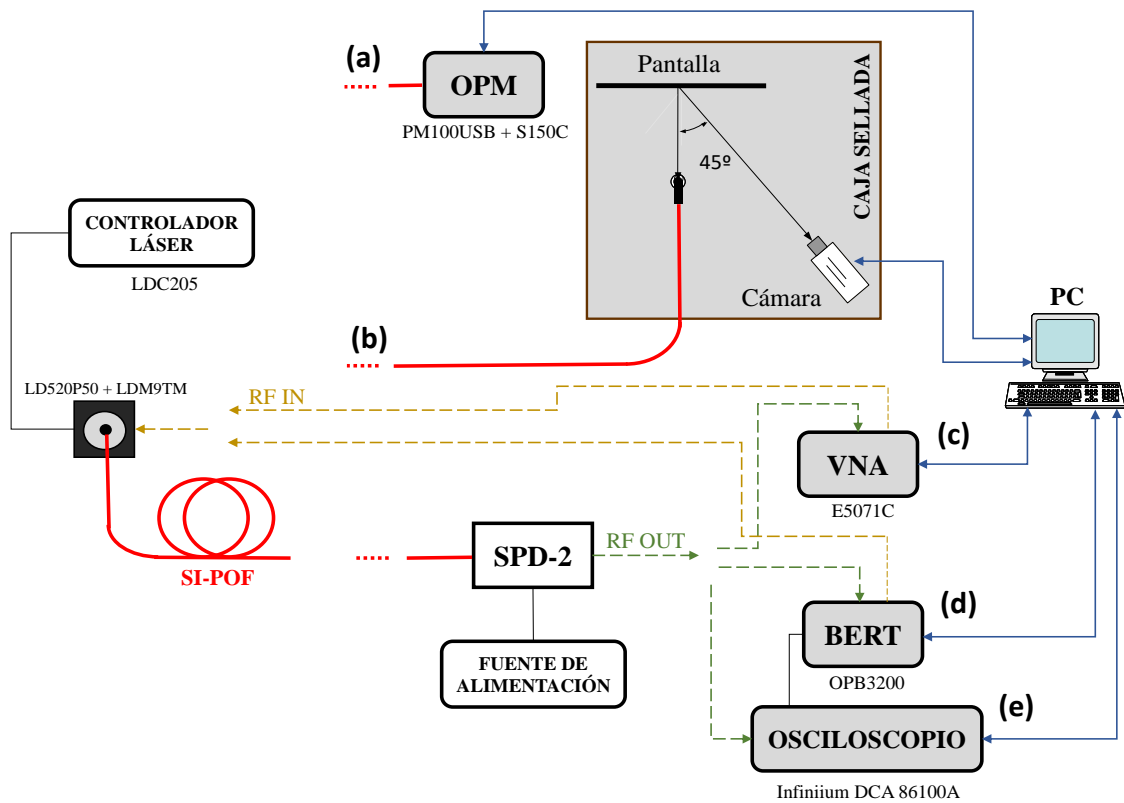


Figura 3.1: Sistema experimental para obtener: (a) potencia óptica recibida; (b) imágenes FFP; (c) parámetro de transmisión S_{21} ; (d) BER; (e) diagramas de ojo.

Las hojas de características de los equipos de medida y de los dispositivos que componen el montaje experimental se encuentran en el Anexo VII.

3.2. Experimentos previos

Con el objetivo de seleccionar los parámetros óptimos de trabajo se caracterizaron, previamente, los dispositivos involucrados utilizando algunos bloques del montaje experimental descrito en el apartado anterior (Figura 3.1). Además, para planificar adecuadamente los experimentos de caracterización de las SI-POF se realizaron varias medidas de prueba con las diferentes fibras disponibles en el laboratorio. Así, se seleccionaron las longitudes de los carretes de fibra sobre los que, posteriormente, se realizaron los experimentos siguiendo el método de corte.

3.2.1. Selección de parámetros de los dispositivos activos

Antes de realizar los experimentos de corte se caracterizaron las dos fuentes de transmisión utilizadas (LD520 y LD650) y los dos detectores disponibles (SPA y SPD). Como paso previo se midió la curva Intensidad-Potencia de ambas fuentes y la curva de respuesta (Potencia-Voltaje) de los detectores. Estas medidas se presentan en los Anexos III.1 y III.2. Este apartado se centra en describir las respuestas en frecuencia de las distintas combinaciones fuente-detector para determinar las condiciones óptimas para los experimentos.

En primer lugar, se midieron los parámetros de transmisión S_{21} para distintas intensidades de polarización de la fuente LD520, utilizando el acoplador IF-562 de Industrial Fiber Optics, cuya caracterización se realizó y se incluye en el Anexo III.4. El uso del acoplador permite evitar la saturación de los detectores y monitorizar la potencia recibida de forma simultánea a la medida.

En la Figura 3.2 se muestra el parámetro S_{21} para los dos detectores con tres intensidades de polarización: 70, 80 y 90 mA, seleccionadas por estar en una zona intermedia de la curva Intensidad-Potencia suficientemente lejos tanto de la intensidad umbral del láser (45 mA) como de la de saturación (160 mA). Para ambos detectores las curvas tienen una caída a partir de 1.5 GHz que es más abrupta en el caso de 70 mA, mientras que la mayor respuesta en altas frecuencias se obtiene para 90 mA. Sin embargo, se eligió trabajar con 80 mA como compromiso intentando evitar la saturación de los detectores con fibras cortas a la vez que disponer de suficiente potencia en fibras largas. También se obtuvieron los parámetros de transmisión S_{21} para diferentes potencias de RF (-3, 0 y 3 dBm) cuya representación resulta idéntica (Anexo III.2), por lo que el valor seleccionado fue el intermedio, 0 dBm. La curva de BER en función de

la tasa de transmisión conectando el transmisor y el receptor con una fibra de longitud de 1 metro cuyos efectos de atenuación y dispersión se pueden despreciar permite valorar el comportamiento del sistema electrónico (*Back-to-Back*). En la Figura 3.3 se comparan estas curvas para las tres corrientes de polarización con ambos detectores, Estos resultados muestran que las mejores respuestas se obtienen con 80 mA para ambos detectores, incluso aunque con 90 mA se tiene una mayor potencia recibida. También permite valorar las mejores prestaciones del detector SPD.

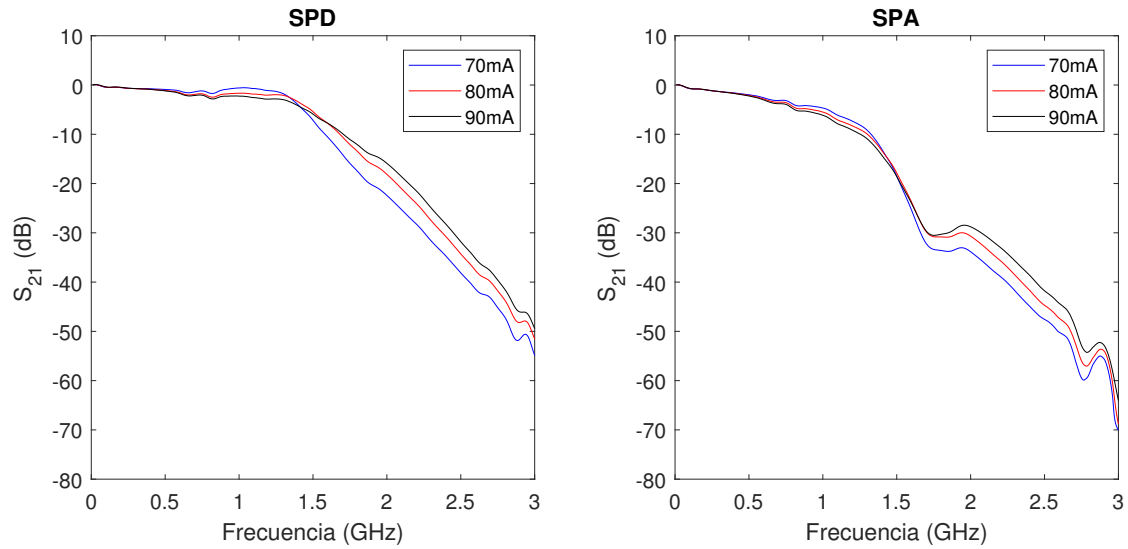


Figura 3.2: Parámetro de transmisión S_{21} para distintas intensidades de polarización para los dos detectores: (a) SPD; (b) SPA.

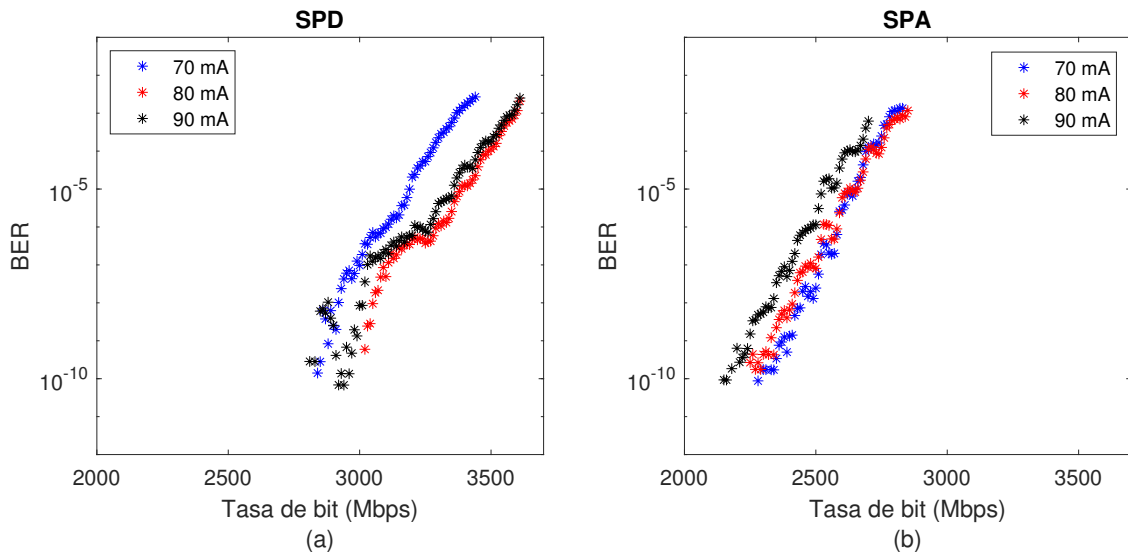


Figura 3.3: BER vs. Tasa de transmisión para distintas intensidades de polarización para los dos detectores: (a) SPD; (b) SPA.

Con el SPA se capta la mayor parte de la potencia óptica que sale de la fibra ya que la apertura de su lente es de 0.48, mayor que la del SPD. Como contrapartida, este detector se satura fácilmente cuando se trabaja con longitudes cortas de fibra. Por otro lado, en la Figura 3.2 se observa que el parámetro S_{21} del SPD está por encima del S_{21} del SPA para todas las intensidades probadas y tiene una caída menos abrupta, lo que se traduce en un mayor ancho de banda y determina la selección del SPD como receptor del montaje experimental.

De forma análoga, se midieron los parámetros de transmisión S_{21} de la fuente LD650 para distintas intensidades y distintas potencias de RF (Anexo III.1). La intensidad de polarización se fijó en 35 mA y la potencia de RF en 0 dBm (-3 dBm si tenemos en cuenta el atenuador de RF, como se explica en el punto 3.1), datos que coinciden con los de un estudio anterior [6].

En la Figura 3.4 se muestran los parámetros S_{21} de las dos fuentes de transmisión y los dos detectores para la intensidad de bias seleccionada en cada caso. Tanto en la Figura 3.4a que muestra la respuesta del SPD como en la Figura 3.4b que muestra la respuesta del SPA, se observa que el S_{21} del láser LD520 está por encima del LD650. Puede concluirse que la respuesta de la fuente LD650 es significativamente peor en el rango de frecuencias hasta 2 GHz, bien por el propio diodo láser o bien por la base utilizada que, aunque es un modelo similar, puede tener características ligeramente diferentes.

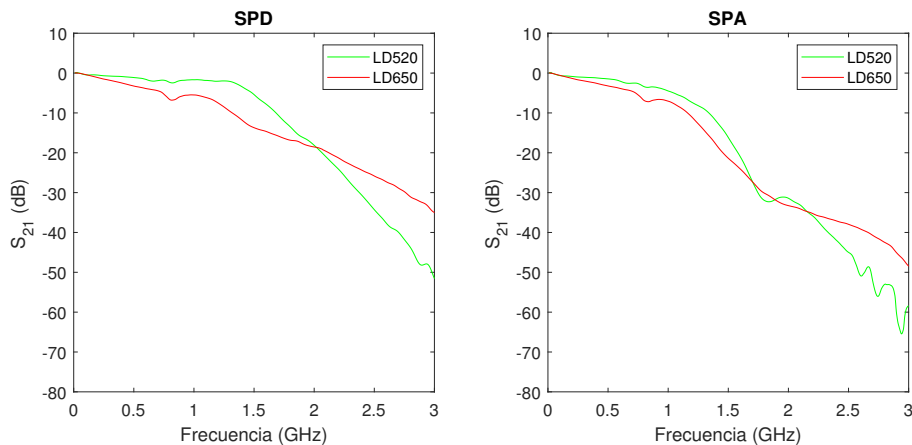


Figura 3.4: Parámetros S_{21} de las fuentes de transmisión para la intensidad óptima de bias y los dos detectores: (a) SPD; (b) SPA.

Para completar la caracterización de los detectores se determinó la potencia de saturación de cada uno de ellos a partir de sus curvas Potencia-Voltaje (Anexo III.2),

tal como se muestra en la Tabla 3.1. Los datos para luz verde se determinaron de forma experimental, mientras que para luz roja se extrajeron de los resultados de otros proyectos [6, 20].

Potencia de saturación (dBm)			
SPD		SPA	
520 nm	650 nm	520 nm	650 nm
3.98	3.01	3.50	2.05

Tabla 3.1: Potencia de saturación de los detectores para 520 nm y 650 nm.

3.2.2. Selección de fibras

Las tres fibras sobre las que se ha realizado el experimento están fabricadas por la compañía Mitsubishi Rayon CO., LTD., son de perfil de salto de índice, de igual material (PMMA) y tamaño (núcleo de 1 mm de diámetro), aunque con distintas características, tal y como muestra la Tabla 3.2 [13]. Las hojas de características de estas fibras se encuentran en el Anexo VII.

La MH4001 (MH), también llamada ESKA-MEGA, es una fibra de baja apertura numérica (0.3), conseguida con una doble cubierta. La GH4002 (GH), también llamada ESKA-PREMIER, es una fibra dúplex (dos fibras unidas en un solo carrete) de apertura estándar (0.5). Por último, la BH4001 (BH) tiene la mayor apertura numérica (0.58) y es resistente a la temperatura, lo que hace que sea adecuada para aplicaciones en entornos hostiles.

Fibra		NA	Atenuación (650 nm)	Material de la cubierta
MH-4001	MH	0.30	0.16 dB/m	Polietileno (PE)
GH-4002	GH	0.50	0.17 dB/m	Polietileno (PE)
BH-4001	BH	0.58	0.20 dB/m	Polietileno reticulado (PEX)

Tabla 3.2: Características de las fibras analizadas.

En la Figura 3.5 se muestran las imágenes de campo cercano (*Near-Field-Pattern*, NFP) de cada uno de los tipos de fibra. Estas imágenes se obtuvieron con una cámara Digimicro (1.3 Mpixel, 200X de aumento) enfocando el extremo de salida de la fibra e introduciendo luz natural por el otro extremo, siguiendo el montaje descrito en el Anexo II.

La medida del NFP se aplica para determinar los parámetros geométricos de la fibra (tamaño del núcleo, tamaño de la cubierta, excentricidad, etc.) y su perfil de índice. Puede verse que el NFP de la fibra MH es diferente de las demás, presentando una doble cubierta que permite conseguir su menor apertura numérica [1]. Por otra parte, el color verde indica que la transmisión de esta longitud de onda presenta menor atenuación que las demás.

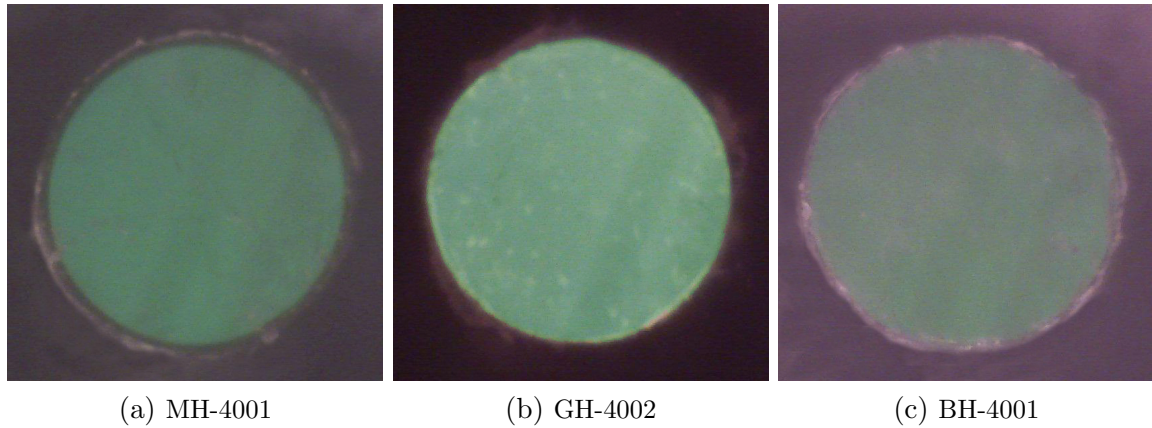


Figura 3.5: Sección de las fibras analizadas.

Una vez se caracterizaron los dispositivos activos del sistema, lo que permitió seleccionar alguno de los parámetros de trabajo para planificar el experimento de corte, se realizaron medidas preliminares en fibras largas para determinar la longitud máxima de cada carrete de fibra. El parámetro más significativo a la hora de determinar esta longitud es la tasa de error de bit en función de la tasa de transmisión.

De esta forma, se realizaron medidas de BER frente a la tasa de transmisión para varios carretes de distintas longitudes disponibles en el laboratorio, utilizando como fuente de emisión el láser LD520 y como detector el SPD-2. Algunas de estas medidas se presentan en la Figura 3.6.

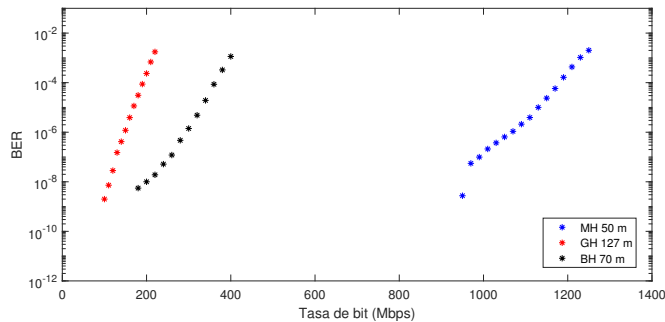


Figura 3.6: BER vs. Tasa de transmisión, fibras largas.

Puede verse el buen comportamiento obtenido para 50 metros de MH-4001, pero como no fue posible medir BER con 150 m, la longitud más larga disponible, se cortaron 20 metros y se planificó el experimento para comenzar 130 metros, longitud para la cual justo se puede obtener alguna medida. También se probó con un carrete de 127 metros de GH-4001, similar a la GH-4002 pero con una sola fibra, obteniendo errores por debajo de 10^{-6} por lo que se decidió cortar 150 metros del carrete dúplex y partir de esta longitud para la que se obtuvieron medidas aunque con alto BER. Por último, la medida de 70 metros de BH-4001 produjo resultados relativamente pobres en comparación. Como medidas realizadas en el laboratorio con esta fibra especial para alta temperatura habían mostrado que sus prestaciones son menores que las de las fibras convencionales, decidimos comenzar el experimento de corte con 100 metros. Se hicieron también pruebas con el SPA que, al captar mayor potencia óptica, podría suponer una ventaja en longitudes de fibra largas pero los resultados no mejoraron los obtenidos con el SPD.

3.2.3. Parámetros de trabajo

Con los elementos activos del montaje experimental completamente caracterizados y las longitudes de cada carrete seleccionadas ya se dispone al completo de los parámetros óptimos de trabajo con los que se realizaron los experimentos de caracterización de las distintas fibras (Tabla 3.3).

Longitud de fibra (m)			Fuente de transmisión			Detector
MH	GH	BH	Láser	Ibias (mA)	Potencia RF (dBm)	
130	150	100	LD520	80	0	SPD
–	150	–	LD650	35	-3	SPD

Tabla 3.3: Parámetros de trabajo de los experimentos de corte.

Por último, como paso previo a la realización del experimento de corte, se verificó que las fibras seleccionadas estuvieran en buen estado y que su longitud fuera la correcta utilizando un Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR). El OTDR es un instrumento que permite determinar la traza de una fibra y obtener su longitud y atenuación para una longitud de onda dada (en este caso, 630 nm). A partir de los eventos presentes en la traza obtenida se puede determinar la presencia de empalmes, conectores, roturas de la fibra, etc.

En el caso de las fibras dúplex se observó el deterioro de sus prestaciones al separar

los dos tramos que las componen en fibras individuales. Por eso, solo se separaron unos pocos centímetros en los extremos para realizar los experimentos de corte y se verificó, mediante la obtención de su traza en el OTDR, que esta separación no introdujo alteraciones en la fibra.

Todas las medidas realizadas con el OTDR se muestran en el Anexo I.2.

3.3. Protocolo de medida

Para analizar las propiedades de transmisión de las SI-POF se aplicó un protocolo experimental basado en el método de corte, esquematizado en la Figura 3.7.

Se partió de una fibra larga, con una determinada longitud L , enrollada en un carrete de 20 cm de diámetro. Uno de sus extremos (punta interna) se preparó cortando, pelando el tramo necesario para insertarlo en un conector y puliendo con dos lijas, tal y como se describe en el Anexo I.1, para conectarse al láser mediante un conector ST. Este extremo se mantuvo fijo durante todo el experimento de corte para garantizar que las medidas tomadas para todas las longitudes de fibra se realizaran con las mismas condiciones de inyección, ya que la SI-POF es muy sensible a los cambios en la inyección y sus propiedades de transmisión podrían verse afectadas [21]. El otro extremo (punta externa) se preparó también y se conectó a distintos dispositivos para tomar las medidas deseadas. Una vez realizadas se cortó un segmento del extremo externo de la fibra, se preparó y se realizó de nuevo la serie de medidas para la siguiente longitud. Este procedimiento se repitió hasta llegar a un tramo de longitud suficientemente corta (1 m) para desprestigiar los efectos de la fibra en las medidas, que fue utilizado como referencia. De esta forma, para cada longitud analizada se obtuvieron:

- 5 medidas de la potencia óptica recibida.
- 5 medidas del parámetro de transmisión S_{21} .
- 15 imágenes de perfil radial de campo lejano.
- 1 curva de BER vs. Tasa de transmisión.
- 2 diagramas de ojo.
- 1 medida del voltaje medio en el detector.

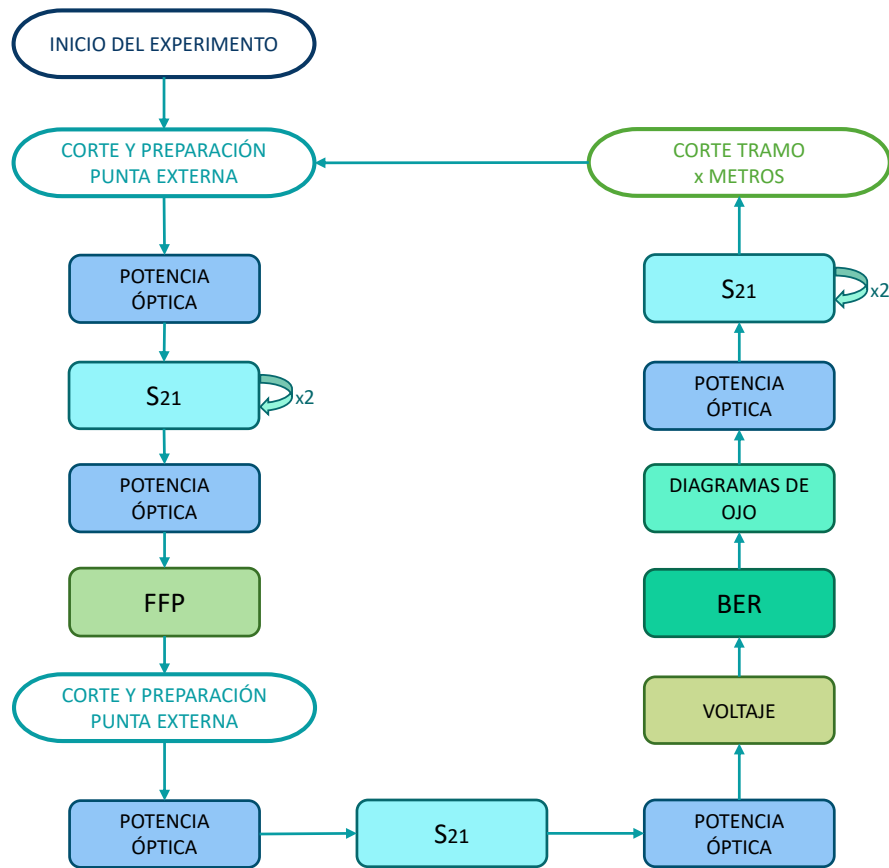


Figura 3.7: Protocolo de medida.

Este protocolo se aplicó a las tres fibras con algunas variaciones y partiendo de una longitud inicial de fibra diferente en función de sus características y disponibilidad, tal como se ha explicado en el apartado anterior (130 m para la MH, 150 m para la GH y 100 m para la BH). Además, aprovechando la ventaja de que la fibra GH es una fibra dúplex, se ejecutó el protocolo experimental de la Figura 3.7 simultáneamente para luz roja y verde. De esta manera, el extremo interno de una de las dos fibras del carrete dúplex se conectó al láser LD650 y el otro al láser LD520, mientras que el extremo de salida de cada fibra se conectó secuencialmente a los diferentes dispositivos para obtener el conjunto completo de medidas para ambas longitudes de onda en cada longitud de fibra determinada. Durante la realización del experimento, un segmento de unos 10 cm de los extremos de entrada de las dos fibras del dúplex se separó para poder colocar cada extremo en un soporte láser diferente. En los extremos de salida el segmento separado era de solo 3 cm, ya que estos extremos estaban alternativamente conectados a los distintos dispositivos.

El protocolo concreto para cada fibra se muestra con detalle en el Anexo IV.

3.4. Obtención de funciones y parámetros

Con el objetivo de explicar cómo se obtiene cada parámetro se toma como ejemplo la serie de medidas realizada para la fibra MH. Siguiendo el protocolo de medida descrito en el apartado anterior, se obtuvieron medidas de potencia óptica, parámetro S_{21} , FFP y BER para las siguientes longitudes, en metros: 130, 110, 100, 85, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 5 y 1. Los resultados de la serie de medidas obtenidos para las otras fibras se encuentran en el Anexo V.

3.4.1. Potencia óptica recibida

Como se ha descrito en el protocolo de medida, para cada longitud de fibra analizada se midió la potencia al menos 5 veces, intercalando su obtención entre otras medidas y cambiando la preparación de la fibra (corte, pelado y pulido) en, al menos, dos ocasiones. El promedio de estas medidas se muestra en la Figura 3.8 junto a su desviación estándar. La pendiente de la recta de ajuste, que se muestra en la misma figura, representa la atenuación total del carrete de fibra en dB/m.

El valor de esta pendiente es de 0.15 dB/m para 520 nm de longitud de onda, algo menor que los 0.16 dB/m de atenuación en 650 nm que proporciona su hoja de características y que se muestra en la Tabla 3.2.

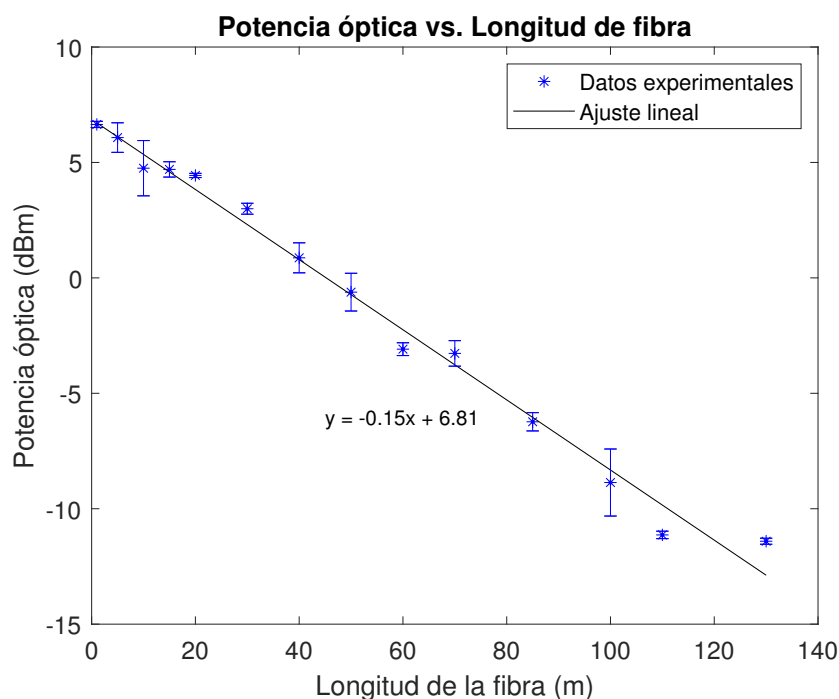


Figura 3.8: Potencia óptica recibida vs. Longitud de la fibra, MH.

3.4.2. Respuesta en frecuencia

Para medir el parámetro de transmisión S_{21} en cada longitud de fibra se utilizó el VNA, tal como se explica en el apartado 3.1, utilizando el interfaz de usuario y la configuración que se especifican en el Anexo II.

A partir de las medidas del parámetro S_{21} se pueden obtener las respuestas en frecuencia de la fibra como la raíz cuadrada del cociente entre el parámetro S_{21} medido para un tramo de fibra de longitud L y el S_{21} de referencia, medido con un rabillo de 1 metro (Ecuación 3.1). La medida de referencia fue tomada al final del experimento de corte utilizando el último tramo, manteniendo las mismas condiciones de inyección que en el resto del experimento, para tener en cuenta las limitaciones de los dispositivos optoelectrónicos implicados en la medida.

$$H_L(f) = \left(\frac{S_{21L}(f)}{S_{21REF}(f)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

En la Figura 3.9a y 3.9b se muestran, respectivamente, los parámetros de transmisión S_{21} promedio, en dB, de las 5 medidas realizadas junto a su desviación estándar y las respuestas en frecuencia normalizadas de la fibra, obtenidas mediante la Ecuación 3.1, también en dB, junto a su desviación estándar. La leyenda mostrada es válida para ambas representaciones.

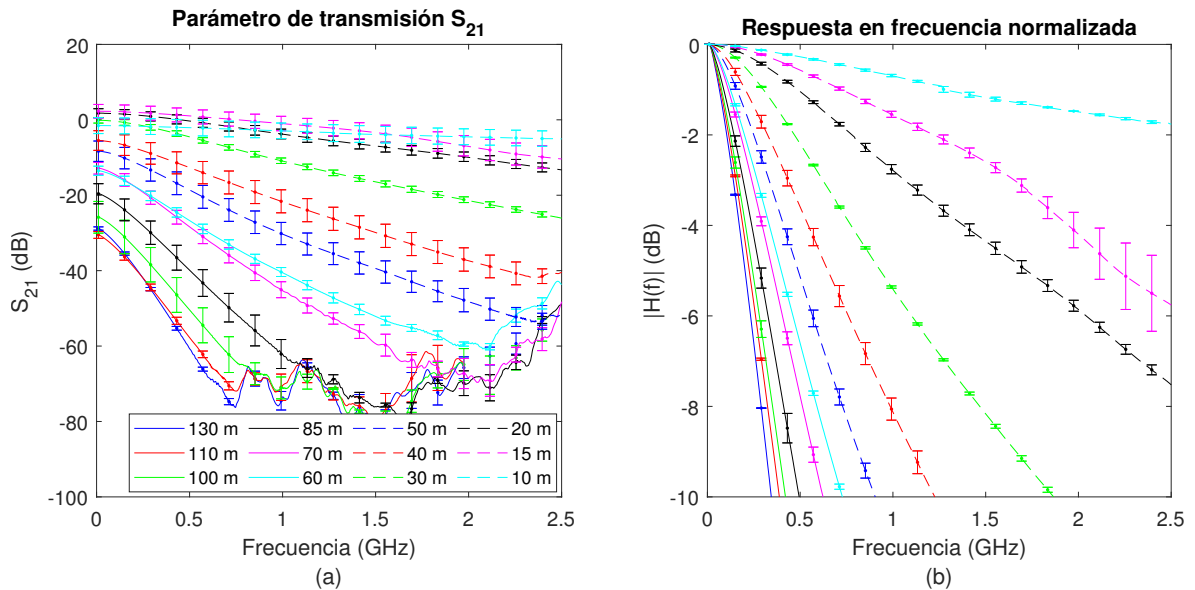


Figura 3.9: Fibra MH: (a) parámetro S_{21} ; (b) respuesta en frecuencia.

El valor máximo del parámetro S_{21} se obtiene en la frecuencia más baja y su valor disminuye al aumentar la longitud de la fibra. Para fibras largas, el parámetro S_{21} toma valores muy bajos, próximos al ruido que se manifiesta en las frecuencias más altas como puede verse en la Figura 3.9a. La variación con la longitud de las respuestas en frecuencia mostradas en la Figura 3.9b ilustra la degradación introducida por la dispersión modal. También puede verse que las curvas de S_{21} en función de la frecuencia son muy similares en las fibras más cortas (20, 15 y 10 metros). Estas medidas están, además, muy cercanas a la de referencia por lo que, al aplicar el cociente de la Ecuación 3.1, las respuestas en frecuencia presentan barras de error grandes que reflejan su alta variabilidad. Esto es particularmente notable en la medida de 15 metros.

3.4.3. Distribución angular de intensidad

La distribución de intensidad que una fuente óptica que se transmite por la fibra viene dada por las condiciones de inyección, las características del láser (apertura, asimetría, etc.) y las características de la fibra (tipo de fibra, longitud de la misma, corte de los extremos, etc.). Una buena aproximación de la distribución de intensidad de la fibra, puede obtenerse a partir de las medidas del patrón de campo lejano. El patrón de campo lejano es la distribución de intensidad en un plano lo suficientemente alejado de la punta de salida de la fibra. Puede considerarse que la simetría de este patrón es rotacional, por lo que suele caracterizarse a partir de su perfil radial, donde el radio está relacionado con el ángulo que forma la luz a la salida de la fibra y con el ángulo de propagación mediante su índice de refracción.

Los cambios de la distribución de intensidad en función de la longitud revelan cómo evoluciona la proporción de luz entre los distintos modos debido a la difusión y a la atenuación, por lo que las medidas de FFP se han utilizado para modelar dichas propiedades [15].

Utilizando el sistema experimental descrito en el apartado 3.1 y un software específico descrito en el Anexo II [22, 23], se capturaron 15 imágenes del FFP de las cuales se obtuvo el perfil radial cada longitud analizada. De las FFP obtenidas para cada longitud en el experimento se ha extraído el flujo angular (*Encircled-Angular-Flux*, EAF), definido como el cociente de un flujo de radiación arbitrario dentro de un ángulo sólido dado, y el flujo de radiación total (Ecuación 3.2).

$$EAF(\theta') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'} I(\theta, \phi) \cdot \frac{\text{sen}(\theta)}{\text{cos}^3(\theta)} \cdot d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} I(\theta, \phi) \cdot \frac{\text{sen}(\theta)}{\text{cos}^3(\theta)} \cdot d\theta d\phi} \quad (3.2)$$

La EAF en función del ángulo indica la proporción de potencia contenida en un cono de un ángulo determinado respecto de la potencia total y permite comparar, independientemente del nivel de potencia inyectada, la forma de la distribución angular [24]. De esta forma, se puede calcular la apertura numérica de salida de la fibra y, si se conocen las características de diseño del receptor, obtener la potencia óptica que recibe su zona activa.

En la Figura 3.10 se muestran los FFP y las EAF para cada longitud de fibra analizada. A la hora de representar las medidas los FFP registrados para cada longitud se han promediado para dar lugar a un único perfil radial y una única EAF. Los perfiles radiales se representan sin normalizar. Su valor es similar porque para cada longitud de fibra se ajustó el tiempo de exposición para obtener la misma respuesta sin saturar.

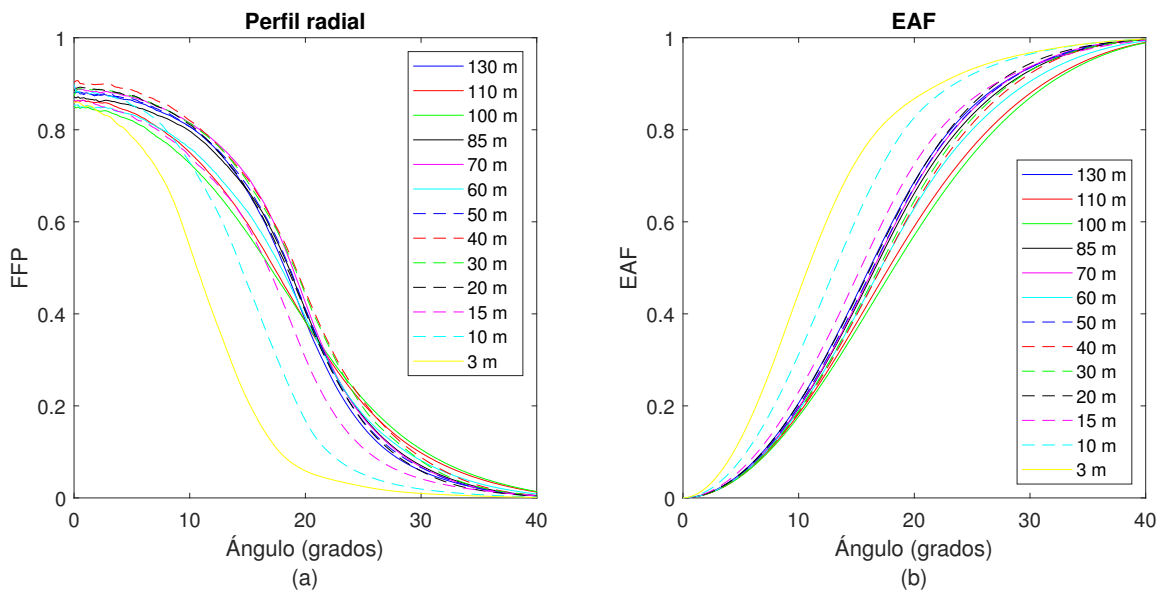


Figura 3.10: Fibra MH: (a) FFP; (b) EAF.

Las EAFs se ensanchan conforme aumenta la longitud hasta llegar a 20 metros. A partir de esta longitud tienen formas y anchuras similares con una cierta variabilidad que podría atribuirse a las diferentes terminaciones del extremo de salida de la fibra, que cambiaba para cada longitud de fibra. Concretamente, esta fibra (MH) es la de menor apertura numérica, conseguida mediante una doble cubierta. En los experimentos se ha observado que esta estructura es más sensible a la preparación, particularmente al

pulido, produciendo medidas de potencia y distribución de intensidad muy diferentes dependiendo del resultado de la misma.

Por otro lado, la medida del FFP para una longitud de fibra larga corresponde con la distribución de intensidad de equilibrio. Al transmitirse la luz por las fibras de salto de índice se produce acoplo modal causado por la difusión que normalmente introduce intensidad en ángulos más altos. Al propagarse por la fibra, esta transferencia de potencia óptica se compensa con la atenuación, que es mayor para ángulos altos. De esta forma, para longitudes suficientemente largas, se alcanza la distribución modal de equilibrio (*Steady State Distribution*, SSD) que, a partir de entonces, modifica únicamente su amplitud, a causa de la atenuación, pero no su forma. El SSD junto con el coeficiente o la función de difusión permiten obtener la atenuación angular (o modal) [15], por lo que es una medida importante para caracterizar un tipo de fibra. Para modelarlo mediante una función analítica se eligió el producto de dos funciones sigmoides del ángulo de propagación al cuadrado (Ecuación 3.3), cuyos parámetros de caracterización dan flexibilidad suficiente para describir las diferentes pendientes de la distribución de intensidad en función del ángulo de propagación [15].

$$Q_N(\theta) = \frac{\left(1 + e^{-\sigma_1^2 \theta_1^2}\right) \left(1 + e^{-\sigma_2^2 \theta_2^2}\right)}{\left(1 + e^{-\sigma_1^2 (\theta_1^2 - \theta^2)}\right) \left(1 + e^{-\sigma_2^2 (\theta_2^2 - \theta^2)}\right)} \quad (3.3)$$

Las imágenes FFP obtenidas para la longitud más larga (130 metros) se utilizaron para modelar la distribución de equilibrio (Figura 3.11) cuyos parámetros de ajuste óptimos a la función bisigmoide, calculados siguiendo la Ecuación 3.3, se muestran en la Tabla 3.4. Según la leyenda, en color azul se muestran los datos experimentales y en rojo el ajuste. Observando la gráfica se ve que la aproximación del modelo bisigmoide es muy similar a los datos tomados, lo cual puede comprobarse observando el error cuadrático medio (*Root-Mean-Square Error*, RMSE), mostrado en la Tabla 3.4, cuyo valor es muy pequeño.

Fibra	Atenuación	Parámetros						
	520 nm (dB/m)	a	σ_1	θ_1	σ_2	θ_2	b	RMSE
MH	0.15	0.8846	44.5700	0.0441	1.59e-10	1.0000	0.0010	0.0105

Tabla 3.4: Fibra MH: parámetros de ajuste de SSD a bisigmoide.

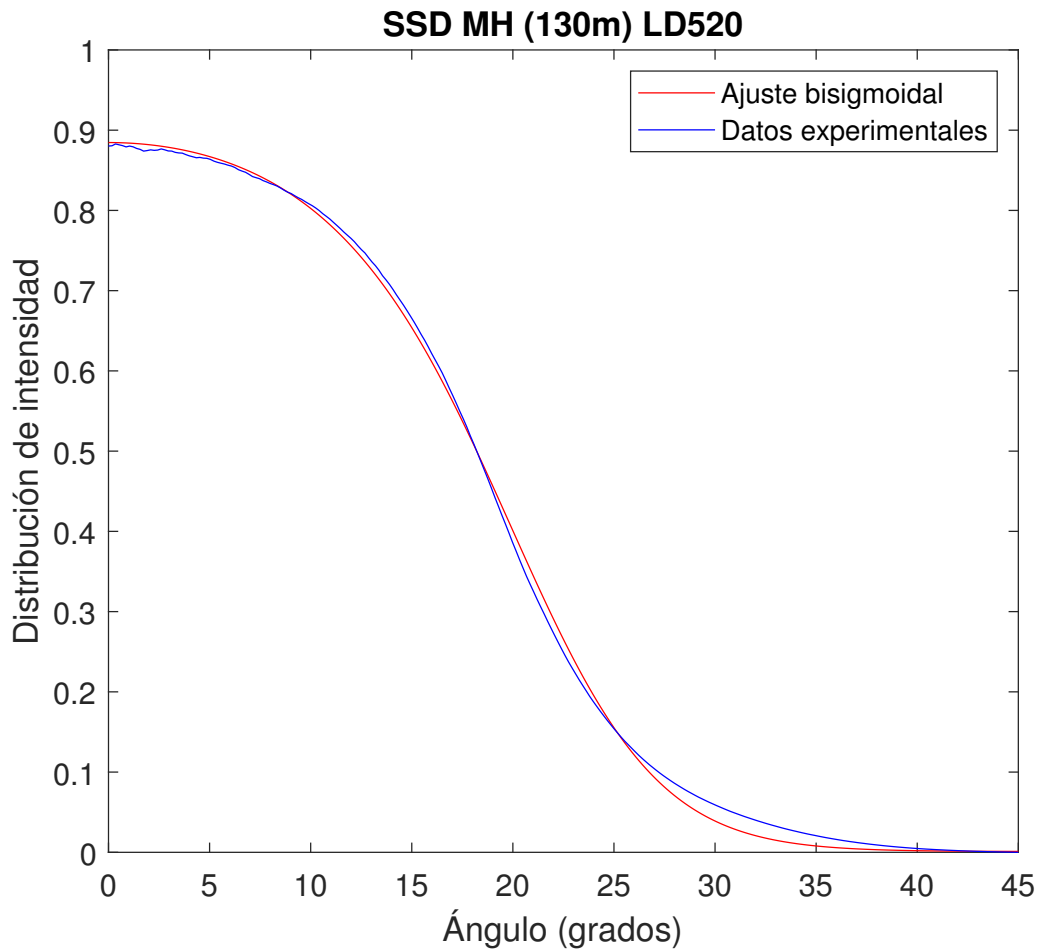


Figura 3.11: Fibra MH: SSD y ajuste bisigmoidal.

3.4.4. BER y diagramas de ojo

La tasa de error de bit es un parámetro que se utiliza para caracterizar el funcionamiento de un sistema digital completo. Indica la precisión con la que el receptor es capaz de determinar el estado lógico de cada bit transmitido. Dependiendo del sistema de comunicaciones, se puede exigir mayor calidad que un BER 10^{-6} , aunque este es un valor habitual, es decir, de cada 10^6 bits enviados permiten uno erróneo. De hecho, si se incluye en el receptor un algoritmo de corrección de errores (*Forward Error Correction*, FEC), se suele tomar como límite un BER de 10^{-3} .

Para medir el BER en función de la tasa de transmisión se utilizó la configuración experimental explicada al inicio del capítulo y el software de control descrito en el Anexo II [16]. Estas curvas se muestran en la Figura 3.12 para cada longitud de fibra. Se muestra también la curva de referencia del sistema (*back-to-back*, B2B), medida con

una fibra muy corta (1 metro) conectada directamente al láser y al receptor.

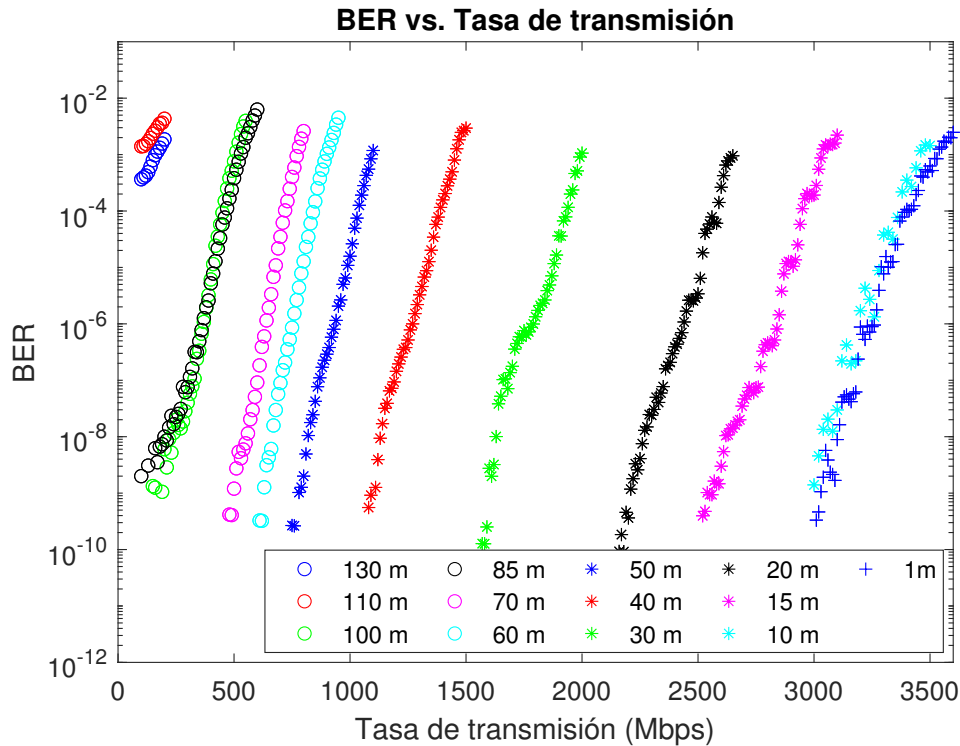


Figura 3.12: Fibra MH: BER vs. Tasa de transmisión.

La curva de referencia es similar al BER medido para una longitud de 10 metros de fibra, lo cual indica que, hasta esa longitud, la fibra no introduce degradación en el sistema. En 100 metros el BER se mantiene por debajo de 10^{-6} hasta los 400 Mb/s. A partir de 100 metros, al disminuir la atenuación y la dispersión modal, las curvas de BER se desplazan hacia la derecha, lo que indica una mejora en el rendimiento del sistema, transmitiendo tasas superiores a 1.5 Gb/s con un BER por debajo de 10^{-6} de 10 a 30 metros. Por otro lado, se observa que para 130 y 110 metros el error está por encima de 10^{-3} para todas las tasas de bit probadas, por lo que no ha podido calcularse la tasa para un BER de 10^{-6} .

Para cada longitud de fibra se tomaron los correspondientes diagramas de ojo en tres valores típicos de BER: 0, 10^{-6} y 10^{-3} . En la Tabla 3.5 se muestra la comparación de estos valores para el tramo de 30 metros de longitud junto con la potencia y el voltaje medio presentes a la salida de la fibra en el momento de su captura. Se observa que a medida que aumenta la tasa de transmisión también lo hace el número de bits erróneos debido a la interferencia intersimbólica (*Intersymbolic Interference*, ISI) causada por la limitación de las propiedades frecuenciales del sistema, incluyendo la fibra.

Longitud de fibra: 30 metros					
Potencia óptica: 2.85 dBm			Voltaje medio: 457.18 mV		
BER = 0	1.5 GHz	BER = 10e-6	1.8 GHz	BER = 10e-3	2 GHz

Tabla 3.5: Fibra MH: diagramas de ojo para una longitud de fibra de 30 m.

En la Tabla 3.6 se muestran varios diagramas de ojo para distintas longitudes y una misma frecuencia, en este caso, 500 MHz. Se observa que los diagramas de ojo se van cerrando a medida que aumenta la longitud de la fibra, ya que disminuye la potencia recibida debido a la atenuación y la relación señal ruido es menor, aumentando el número de errores. Para 50 y 60 metros no existen errores en la transmisión. En 70 metros se observa un diagrama de ojo más cerrado que los anteriores, pero lo suficientemente abierto como para detectar la señal recibida sin demasiados errores (BER = 10^{-8}). Sin embargo, para tramos de 100 metros de fibra el BER está por encima de 10^{-6} para frecuencias superiores a los 400 MHz. Al fijar la frecuencia en 500 MHz la tasa de error de bit es de 10^{-3} , hecho que coincide con lo comentado anteriormente y que puede comprobarse capturando, para 100 metros, un diagrama de ojo muy cerrado.

Frecuencia: 500 MHz							
50 m	Potencia: -1.24 dBm	Voltaje: 156.26 mV	BER = 0	60 m	Potencia : -2,85 dBm	Voltaje: 115.12 mV	BER = 0
70 m	Potencia: -3.76 dBm	Voltaje: 101.18 mV	BER = 10e-8	100 m	Potencia: -7.12 dBm	Voltaje: 50.58 mV	BER = 10e-3

Tabla 3.6: Fibra MH: diagramas de ojo para una frecuencia de 500 MHz.

Capítulo 4

Comparación de las propiedades de transmisión para SI-POFs de distintas aperturas

En este capítulo se comparan las propiedades de transmisión en función de la longitud de la fibra de las tres SI-POFs analizadas: MH (0.3), GH (0.5) y BH (0.6), utilizando el diodo láser LD520 como fuente de transmisión.

En primer lugar, se muestran las respuestas en frecuencia, el flujo angular (EAF) y el BER en función de la tasa de transmisión para distintas longitudes de fibra. Además, para la fibra GH, estos resultados se comparan con los obtenidos utilizando el LD650 (rojo) en las mismas condiciones experimentales.

Después, se comparan los parámetros extraídos de estas medidas: potencia óptica recibida, atenuación, ancho de banda a 3 dB, anchura de EAF al 50 % y al 95 % y tasa de transmisión para un BER de 10^{-6} en función de la longitud.

Los programas desarrollados en MATLAB para realizar el procesado de las medidas obtenidas con los distintos sistemas experimentales, para extraer de ellas los parámetros de transmisión y para las representaciones en función de la longitud de fibra se presentan en el Anexo VI.

4.1. EAF

La Figura 4.1 muestra las EAFs obtenidas para cada fibra en varias longitudes seleccionadas: 100, 50, 20, 15 y 1 metros, y en la longitud máxima medida, que fue diferente para cada tipo de fibra (130 metros para la MH, 150 metros para la GH y 100 metros para la BH). Esta figura ilustra el diferente comportamiento de cada fibra

en función de la longitud.

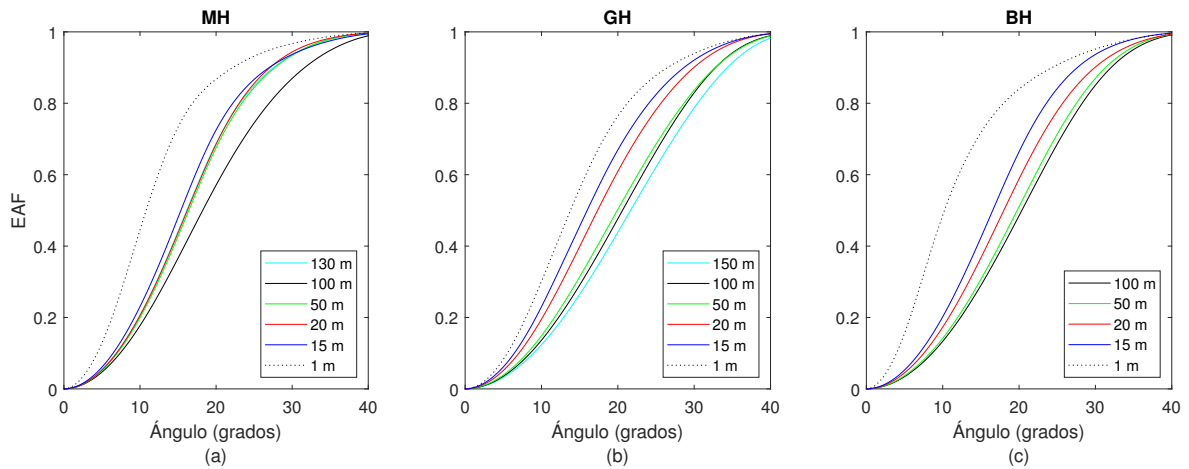


Figura 4.1: EAF en longitudes de fibra seleccionadas: (a) MH; (b) GH; (c) BH.

En primer lugar, para la longitud de 1 metro, se observa que la EAF es muy estrecha en las fibras MH y BH, lo que sugiere una inyección muy direccional en ángulos bajos, mientras que en el caso de la GH es más ancha. Como se ha explicado en el capítulo anterior, cuando se realiza el acoplo directo al diodo láser, las condiciones de inyección son muy variables dependiendo de la terminación de la fibra y la posición del conector. Las EAF de las fibras GH y BH, cuyas aperturas son mayores, presentan una anchura de EAF mayor a medida que se incrementa la longitud de la fibra, lo cual puede explicarse por la difusión de potencia [15]. Además, los pequeños cambios entre las EAF de la GH y la BH en las longitudes más largas indican que la distribución modal de equilibrio se alcanzó, para ambas fibras, en la longitud máxima medida. Por el contrario, la fibra MH presenta un comportamiento muy diferente, ya que el ancho de EAF no aumenta con la longitud y su mayor anchura se encuentra en 100 metros en lugar de en la longitud máxima (130 metros). Durante el experimento de corte, se observó que, particularmente para esta fibra, el pulido del extremo produjo cambios significativos tanto en la potencia de salida como en la forma de los FFP, introduciendo mayor variabilidad en estas medidas. Este comportamiento puede explicarse por la alteración de la estructura de doble cubierta de la fibra MH, causada al pulir el extremo de salida.

4.2. Respuesta en frecuencia

Las respuestas en frecuencia, calculadas a partir de la Ecuación 3.1, se muestran en la Figura 4.2 para los tres tipos de fibra estudiados. Como ya se ha explicado, las líneas muestran el promedio de las 5 medidas tomadas y las barras de error, su desviación

estándar. Las longitudes para las que se muestran estas respuestas en frecuencia son: 100, 70, 50, 30, 20, y 15 metros. Además, se han incluido en la figura las medidas para las respuestas en frecuencia medidas para las longitudes más largas de la fibra MH (130 metros) y GH (150 metros). La longitud más larga medida para la fibra BH fue 100 metros.

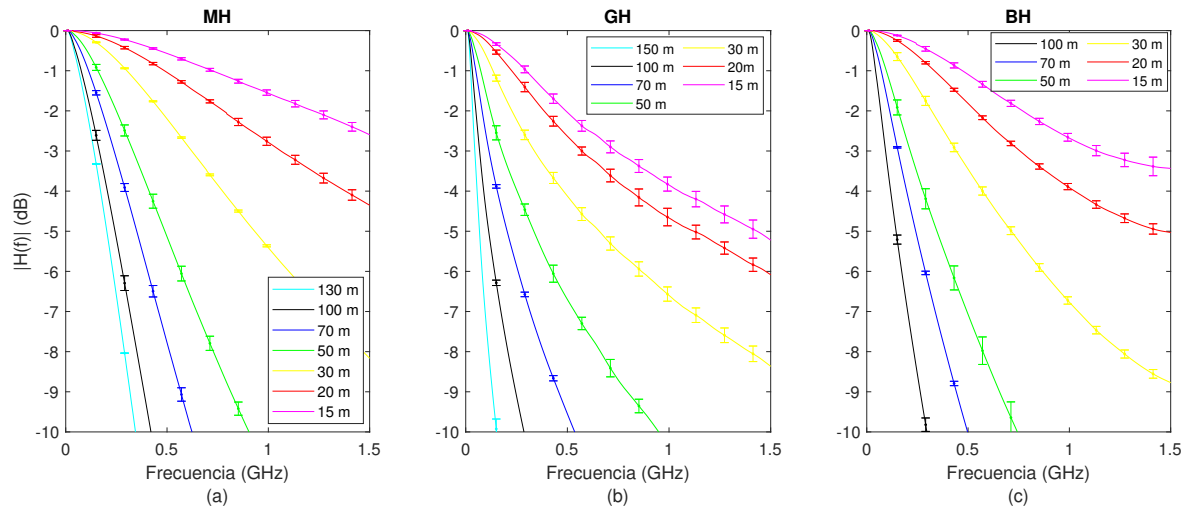


Figura 4.2: Respuesta en frecuencia normalizada en longitudes de fibra seleccionadas: (a) MH; (b) GH; (c) BH.

Todas las gráficas de la Figura 4.2 muestran un estrechamiento de la respuesta en frecuencia de la fibra con el aumento de la longitud, causado por la dispersión modal. Al comparar estas gráficas se observa que la fibra MH tiene las respuestas en frecuencia más anchas que el resto de fibras en todas las longitudes, lo cual es consistente con su apertura reducida [1, 25]. Por otro lado, las fibras GH y BH presentan respuestas en frecuencia similares en longitudes largas, aunque, para 15 y 20 metros, son claramente mejores las de la BH. Esta diferencia podría estar causada por diferentes condiciones de inyección de la fibra GH que se realizó con una distribución angular inicial bastante más ancha, como indica el ensanchamiento de su EAF para 1 metro (Figura 4.1). En este tipo de inyección (llamado en inglés "*overfilled launch*") la potencia óptica se transmite en ángulos altos (modos de orden alto) que son los que presentan mayores retardos, aumentando así la dispersión modal que degrada la respuesta en frecuencia, particularmente, para longitudes de fibra más cortas que se encuentran lejos de la distribución modal de equilibrio. Al contrario, en la inyección direccional como la obtenida para las otras fibras (conocida en inglés como "*underfilled launch*") la potencia óptica se concentra en los ángulos bajos, próximos al eje, con menores retardos dando lugar a una mejor respuesta frecuencial.

4.3. BER

Del mismo modo que en las figuras anteriores, en la Figura 4.3 se muestran las curvas de BER frente a la tasa de transmisión para las tres fibras. Las curvas se muestran para las mismas longitudes que para las respuestas en frecuencia, sustituyendo el BER para 15 metros por el de 10 metros. En todas las gráficas se muestra la curva *back-to-back* (B2B) como una línea discontinua en negro.

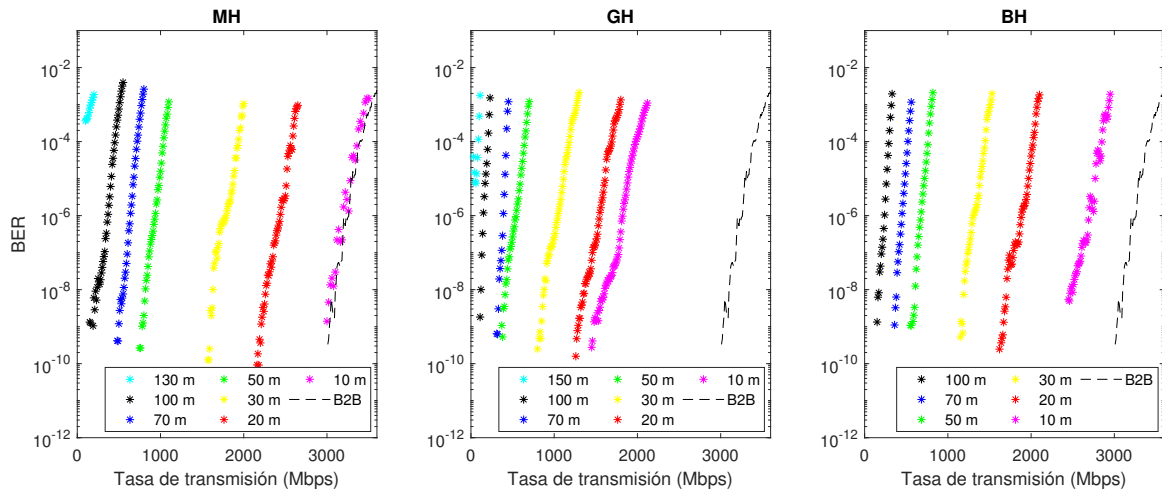


Figura 4.3: BER vs. Tasa de transmisión en longitudes de fibra seleccionadas: (a) MH; (b) GH; (c) BH.

Las curvas se desplazan hacia la derecha conforme disminuye la longitud de la fibra y el enlace funciona a tasas de bit más elevadas. Para el tramo de fibra MH de 10 metros, la curva coincide con la curva B2B del sistema, lo cual indica que, por debajo de esta longitud, la fibra no introduce degradación en el sistema. Para las fibras GH y BH la longitud del enlace debe acortarse por debajo de los 5 metros para alcanzar el comportamiento B2B, de manera consistente con sus respuestas en frecuencia más bajas.

4.4. Comparación de resultados para la fibra GH en 520 nm y 650 nm

Como ya se ha comentado, el experimento de corte de la fibra GH dúplex se realizó simultáneamente para dos longitudes de onda distintas: 520 nm y 650 nm. En la Figura 4.4 se muestran la EAF, la respuesta en frecuencia y el BER que se han medido para cada longitud de onda para una selección de longitudes de fibra: 150, 100, 70, 50, 30

y 20 metros. Las líneas continuas corresponden a la luz verde y las discontinuas a la roja. En la representación de BER, los asteriscos corresponden al verde y los círculos al rojo, tal como se indica en la leyenda.

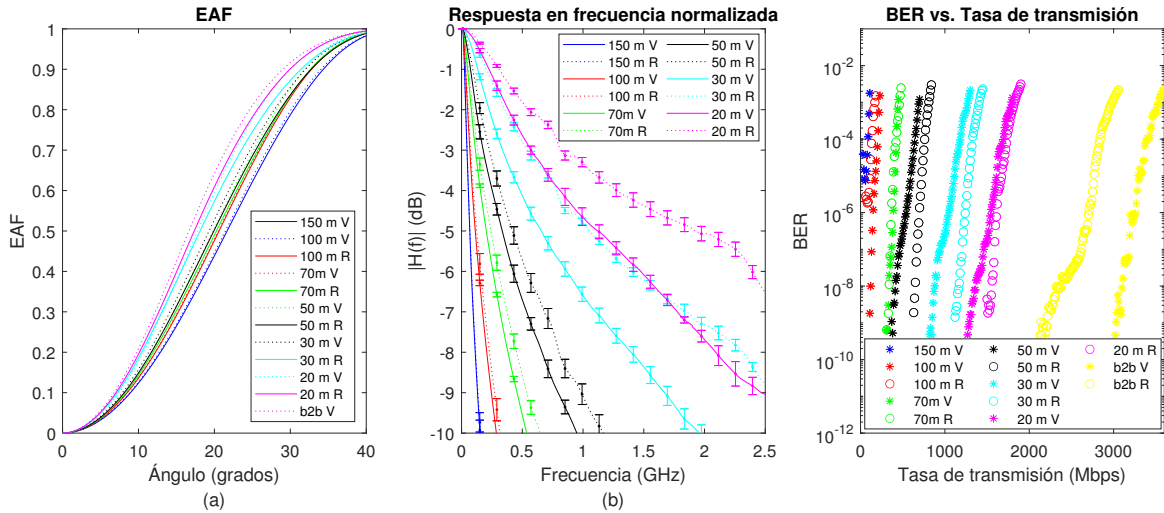


Figura 4.4: Fibra GH. Luz verde vs. Luz roja: (a) EAF; (b) respuesta en frecuencia; (c) BER vs. Tasa de transmisión, en longitudes seleccionadas.

La gráfica muestra una anchura de EAF similar para las dos fuentes de transmisión. En todas las longitudes de fibra analizadas es ligeramente más estrecha para luz roja, pero la diferencia con la luz verde no es significativa. Por otro lado, las respuestas en frecuencia son muy similares para las dos longitudes de onda utilizadas en longitudes de fibra largas. A medida que la fibra se acorta, las respuestas en frecuencia medidas con la fuente roja están claramente por encima de las medidas con la verde, teniendo así un mayor ancho de banda en 650 nm. Aunque estas diferencias pueden deberse a un comportamiento diferente de la fibra según la longitud de onda, también son consistentes con las diferentes condiciones de inyección entre los dos tramos dúplex. Aunque la divergencia del haz en ambos láseres es similar ($7^\circ \times 22^\circ$ en el LD520 y $9^\circ \times 28^\circ$ en el LD650) el acoplo a la fibra es muy sensible a la preparación de la punta y a la posición del conector y pueden obtenerse distribuciones angulares iniciales de anchuras muy diferentes. Del mismo modo, comparando el BER, se observa que la tasa de transmisión es mayor para 650 nm que para 520 nm (aunque el B2B del sistema indica lo contrario), lo cual coincide con lo ya comentado de la respuesta en frecuencia. En el caso del BER, no se pudo medir para la longitud más larga (150 m) utilizando luz roja, debido a la menor potencia recibida ya que el LD650 emite menos potencia y la atenuación en 650 nm es mayor que en el verde.

En la Tabla 4.1 se muestran algunos diagramas de ojo registrados correspondientes a la fibra GH en 520 y 650 nm para un valor aproximado de BER de 10^{-6} .

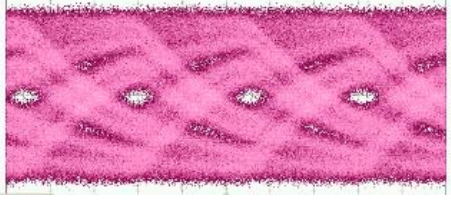
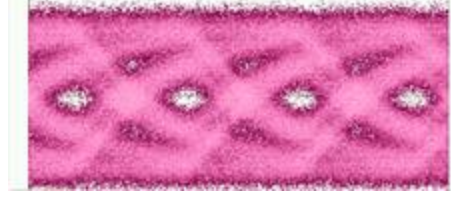
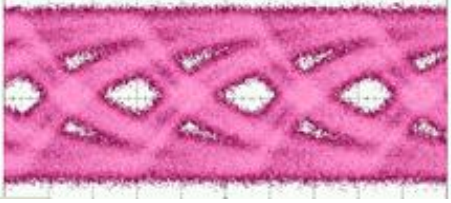



BER = 10e-6						
Longitud	520 nm			650 nm		
70 m	390 MHz	Potencia: -0.03 dBm	Voltaje: 187.05 mV	370 MHz	Potencia: -8.61 dBm	Voltaje: 35.84 mV
						
60 m	380 MHz	Potencia: 0.92 dBm	Voltaje: 231.38 mV	500 MHz	Potencia: -6.8 dBm	Voltaje: 56.19 mV
						
50m	550 MHz	Potencia: 1.88 dBm	Voltaje: 325.16 mV	700 MHz	Potencia: -5.15 dBm	Voltaje: 78.47 mV
						

Tabla 4.1: Comparación de diagramas de ojo en 520 nm y 650 nm para BER de 10^{-6} .

En la tabla se observa que a medida que aumenta la longitud de la fibra la frecuencia para la que se consigue un BER de 10^{-6} disminuye, lo cual coincide con lo ya comentado anteriormente: la tasa de transmisión disminuye con la longitud de la fibra. Por otro lado, la potencia recibida con el LD520 es mucho mayor que con el LD650. Sin embargo, la menor responsividad del detector para luz verde hace que el voltaje medio medido en el receptor no sea mucho mayor. Aún así, para 70 metros o más, supone una ventaja y se pueden alcanzar tasas de transmisión algo mayores. Esta ventaja se pierde para longitudes más cortas.

4.5. Parámetros de transmisión

Finalmente, para ver mejor la evolución de las propiedades de transmisión de la fibra con la longitud, en la Figura 4.5 se muestran los parámetros de transmisión extraídos de las funciones anteriores para cada tipo de fibra utilizando luz verde. Se incluyen también los resultados obtenidos con la fibra GH para luz roja.

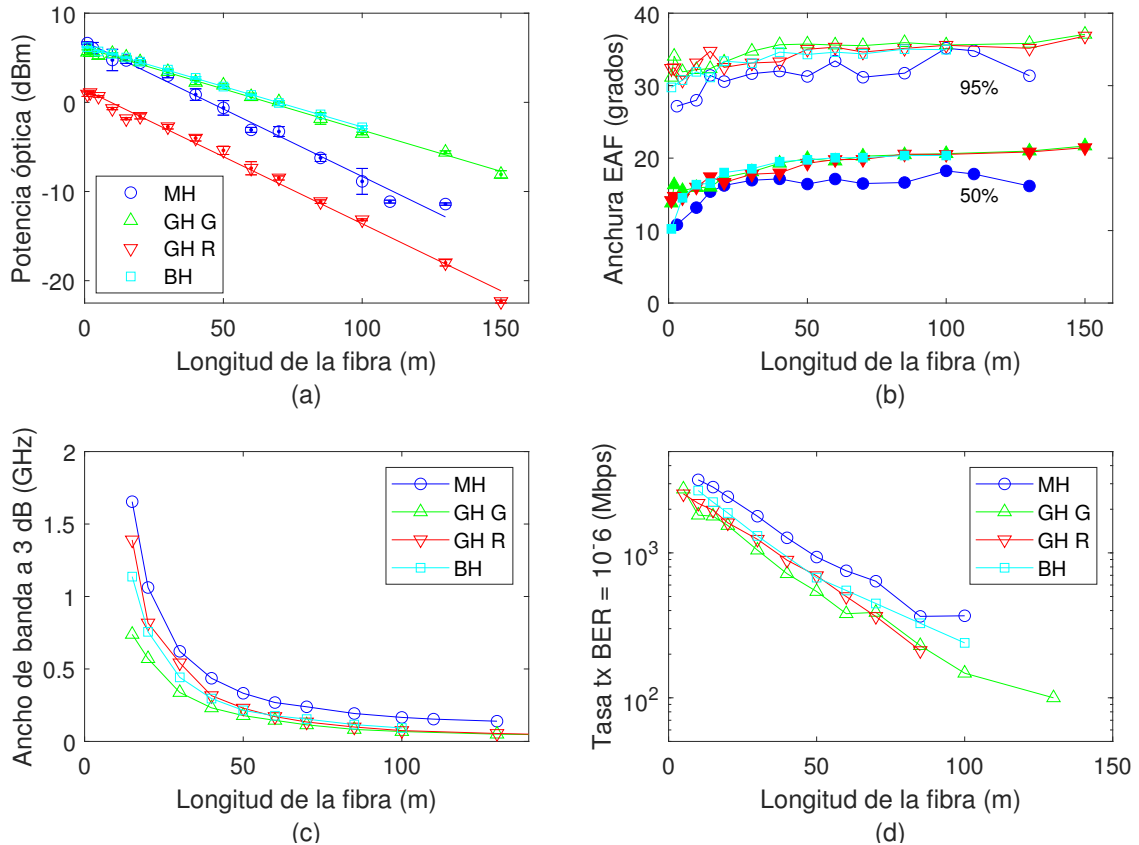


Figura 4.5: Comparación de los parámetros de transmisión: (a) potencia óptica; (b) anchura de EAF; (c) ancho de banda a 3 dB; (d) Tasa de transmisión para $BER=10^{-6}$.

En la Figura 4.5a se muestra la potencia óptica recibida frente a la longitud de la fibra. Los símbolos representan los promedios, las barras de error la variabilidad de las medidas y las líneas rectas el ajuste lineal de los datos experimentales. La pendiente de estas rectas representa la atenuación de la fibra, cuyos valores se muestran en la Tabla 4.2. La atenuación para 650 nm, sacada de las hojas de características, está por encima del valor obtenido a 520 nm para todas las fibras analizadas. Para la fibra MH la diferencia es menos significativa que para las fibras con NA más altas, pero los datos tomados para esta fibra tienen mayor variabilidad, tal como indica el mayor tamaño de sus barras de error.

Fibra	Atenuación (dB/m)	
	520 nm	650 nm
MH	0.15	0.16
GH	0.09	0.15
BH	0.09	< 0.20

Tabla 4.2: Valores de atenuación para distintas fibras y longitudes de onda.

En la Figura 4.5b se muestra la anchura de EAF al 50 % y al 95 % en función de la longitud de la fibra. La distribución angular es más estrecha en el caso de la fibra MH, con un valor de EAF al 50 % de 16° frente a los, aproximadamente, 20° de las otras fibras, lo cual es consistente con su menor apertura [1]. Las diferencias entre la fibra GH y la BH, así como las diferencias entre rojo y verde para la GH no son significativas. Cabe destacar que la anchura de EAF aumenta suavemente con la longitud de las fibras GH y BH, mientras que para la MH es irregular, lo que se atribuye a los efectos del pulido sobre su estructura de doble cubierta.

En la Figura 4.5c se muestra el ancho de banda a 3 dB y en la Figura 4.5d la tasa de transmisión para un BER de 10^{-6} , ambos en función de la longitud de la fibra. Ambas gráficas ilustran un mejor comportamiento de la fibra MH, consiguiendo mayores anchos de banda y tasas de transmisión más altas que el resto de fibras, debido a su menor NA [25]. De hecho, esta fibra puede transmitir en Gigabit-Ethernet hasta 50 metros. Por el contrario, para valores superiores a los 100 metros, no es posible conseguir tasas de error por debajo de 10^{-6} , debido a su mayor atenuación. Para los tres tipos de fibra se alcanzan velocidades máximas superiores a 100 Mbps en 100 metros, por lo que los enlaces basados en luz verde y estas fibras son adecuados para redes de comunicaciones en entornos industriales y redes de datos en aviones. En estas últimas, la presencia de divisores y de un gran número de tramos de fibra interconectados requiere un balance de potencias alto. Además, incluso las fibras de NA más altas (GH y BH) son capaces de transmitir a 1 Gbps y BER de 10^{-6} en enlaces por debajo de 30 metros, lo que también las hace adecuadas para redes domésticas y redes dentro de automóviles.

Las diferencias entre los anchos de banda de las fibras GH y BH son muy pequeñas, siendo algo superiores los valores para la BH. En estudios anteriores los resultados obtenidos mostraron que el ancho de banda de la fibra GH estándar

era significativamente mayor [26]. Esto puede ser causado por las diferencias en las condiciones de inyección a la hora de tomar las medidas. Otra posible razón es que, en este trabajo, se ha utilizado un carrete de fibra BH recientemente adquirido y cuyas características de transmisión han sido mejoradas. Además, la separación de los extremos del carrete dúplex puede haber introducido perturbaciones en la fibra. Por otro lado, existen diferencias entre los resultados obtenidos con luz roja y verde en la fibra GH. A partir de los 50 metros los anchos de banda obtenidos son siempre superiores para 650 nm, con diferencias mayores en las longitudes de fibra más cortas. Además, por debajo de 85 metros, la tasa de transmisión también es mayor para luz roja, aunque para longitudes superiores el enlace no funciona ya que su atenuación en esta longitud de onda es muy elevada. Aunque estas diferencias en las respuestas frecuenciales obtenidas con la GH para ambas longitudes son consistentes con la variabilidad en la inyección (más ancha con el LD520 que con el LD650), no se puede descartar que haya diferencias en el comportamiento de la fibra para las dos longitudes de onda. Por ello, en el capítulo siguiente, se plantean una serie de experimentos diseñados para poner de manifiesto dichas diferencias.

Por último, en la Figura 4.6 se muestra el SSD para los tres tipos de fibra analizados y en la Tabla 4.3 los parámetros de ajuste obtenidos para 520 nm. Se incluyen también el SSD y los parámetros de ajuste para la fibra GH dúplex en 650 nm.

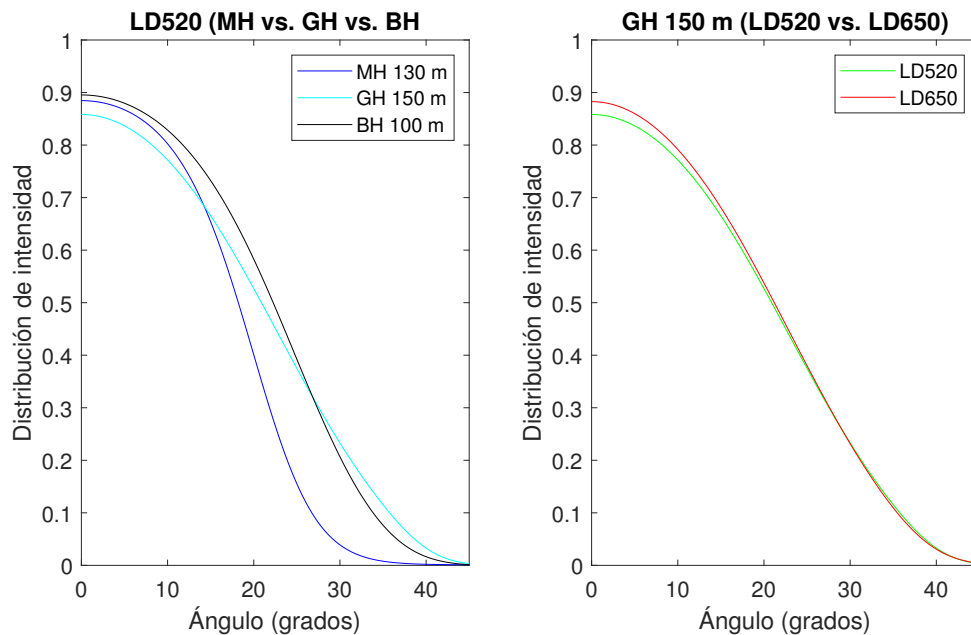


Figura 4.6: Distribución de equilibrio para los tres tipos de fibra: (a) LD520 (MH, GH, BH); (b) GH (LD520 vs. LD650).

La aproximación del modelo bisigmoidal es muy similar a los datos tomados para los tres tipos de fibra y, en el caso de la GH, para las dos longitudes de onda, pues el valor del RMSE mostrado en la Tabla 4.3 es muy pequeño. La fibra MH es la que peor se ajusta, ya que presenta un RMSE algo mayor y la que mejor la GH, puesto que muestra resultados similares tanto en rojo como en verde.

Fibra	Parámetros						
	a	σ_1	θ_1	σ_2	θ_2	b	RMSE
MH	0.8846	44.5700	0.0441	0.0000	1.0000	0.0010	0.0105
GH - 520	0.8583	16.0215	0.0102	40.8228	0.1839	-0.0010	0.0011
GH - 650	0.8827	15.6787	0.0055	35.1045	0.1818	-0.0010	0.0016
BH	0.8954	22.5241	0.0565	30.2788	0.1265	-0.0010	0.0013

Tabla 4.3: Parámetros de ajuste de SSD a bisigmoide para distintas fibras.

Capítulo 5

Comparación de las respuestas en frecuencia en 520 nm y 650 nm

En este capítulo se describe, en primer lugar, el protocolo experimental diseñado para comparar las respuestas en frecuencia obtenidas con el LD520 y el LD650 bajo similares condiciones de inyección con las dos fuentes. Después se presentan los resultados del experimento que se realizó para las tres fibras analizadas con tramos de tres longitudes diferentes: 15, 20 y 50 metros y utilizando ambos detectores: SPD y SPA. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de estas medidas.

5.1. Metodología experimental

Este experimento se diseñó para determinar si las fibras estudiadas tienen diferentes respuestas en frecuencia en función de la longitud de onda utilizada. Para minimizar la variabilidad de las condiciones de inyección que, como se ha dicho dicho, es alta cuando se hace directamente, se realizó la inyección de forma indirecta utilizando un rabillo de fibra como lanzadera. Para fabricar el rabillo, se utilizaron 15 cm de fibra de gradiente de índice de PMMA de 1 mm (GI-POF), al que se insertaron conectores ST en ambos extremos. En la GI-POF la distribución angular de intensidad es muy estable, con una EAF al 50% de 12°, y relativamente independiente de las condiciones de inyección y de la longitud de la fibra [6]. Esta misma técnica se utilizó en un trabajo anterior para iluminar de forma similar todos los núcleos de una fibra multinúcleo [1, 14]. En este caso, el propósito de la inyección indirecta es proporcionar a la fibra analizada una distribución angular de entrada similar para ambas fuentes, independientemente de las características de dichas fuentes y de la terminación de la fibra. Además, la inyección a través del rabillo de GI-POF produce un acoplo a modos o ángulos de más alto orden que la inyección directa del láser en la que, como hemos descrito anteriormente, la

potencia óptica se concentra habitualmente solo en ángulos bajos y, además, presenta una gran variabilidad [21].

El protocolo experimental seguido fue el siguiente. Para cada tramo de fibra analizado, se midieron los parámetros de transmisión S_{21} conectando un extremo del rabillo a uno de los láseres y el otro a la punta interna de la fibra que se quiere analizar mediante un doble conector. Este doble conector no se modifica a lo largo de todas las medidas realizadas con la misma fibra. La punta externa de la fibra bajo análisis se conectó al detector y permaneció conectado cuando el extremo de entrada del rabillo se cambió del LD520 al LD650. De esta forma, la variabilidad en las condiciones de inyección se minimizó al utilizar este rabillo como lanzadera y las condiciones de detección fueron exactamente las mismas para las dos longitudes de onda.

5.2. Respuestas en frecuencia obtenidas con el SPD

En estos experimentos se analizaron los tres tipos de fibra descritos en el apartado 3.2 (Tabla 3.2) en tres longitudes diferentes: 50, 20 y 15 metros. La serie de medidas se repitió dos veces, pero en la Figura 5.1 se muestran los resultados de una única sesión. En todas las gráficas, se muestran las respuestas en frecuencia normalizadas para las fibras MH, GH y BH obtenidas con las medidas del S_{21} y las correspondientes referencias utilizando la Ecuación 3.1. En el caso de la GH se muestra un segundo conjunto de medidas que se tomaron utilizando la otra fibra del segmento dúplex. De esta forma, se pudo evaluar la variabilidad de la fibra.

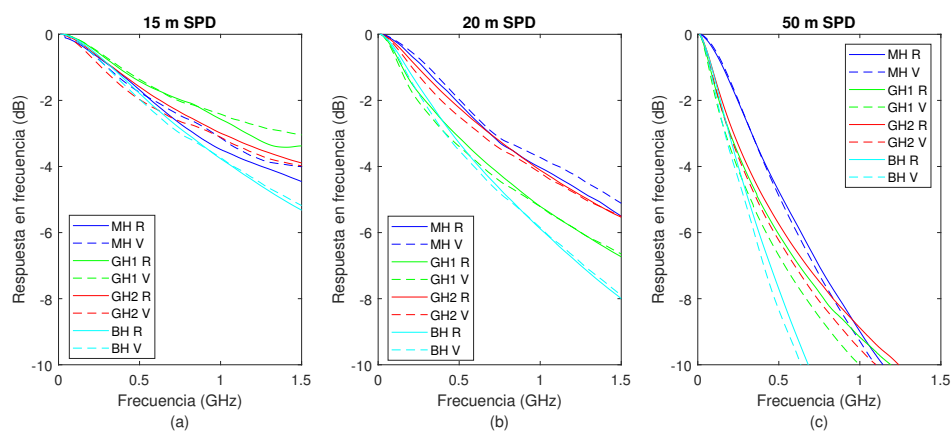


Figura 5.1: Comparación de respuestas en frecuencia SPD: (a) 15 m; (b) 20 m; (c) 50 m.

Los resultados para el SPD, mostrados en la Figura 5.1 revelan que, para todos los tipos y longitudes de fibra, las diferencias entre las respuestas en frecuencia obtenidas

con luz roja y verde son muy pequeñas y que, salvo excepciones, siempre están por encima las tomadas con luz roja. En los tramos de 15 y 20 metros de la MH y 15 metros de la GH1 las medidas tomadas con luz roja están por debajo de las tomadas con luz verde. En estos tres casos, las curvas muestran oscilaciones que pueden atribuirse a pequeñas variaciones presentes en la referencia del sistema o a variaciones introducidas al cambiar la conexión de los cables de RF de una base de control del láser a la otra a la hora de tomar las medidas. Los parámetros S_{21} en fibras cortas son similares a los de referencia, por lo que cualquier alteración, por pequeña que sea, se magnifica al calcular las respuestas en frecuencia a partir de la Ecuación 3.1. Además, las diferencias entre las dos medidas mostradas para la fibra GH para una misma longitud de onda, particularmente para 20 metros, son mayores que las diferencias entre las medidas con luz roja y verde, lo que sugiere que la variabilidad de la fibra tiene más impacto que las diferencias de comportamiento entre las dos longitudes de onda. En este experimento, el detector utilizado es el SPD, cuya lente tiene una apertura de 0.25 (14.5°), es decir, filtra un alto porcentaje de la potencia a la salida de la fibra como puede comprobarse con las medidas de la EAF de la Figura 4.1. Se supone que este efecto podría estar enmascarando las diferencias reales entre los resultados con luz roja y verde, por lo que se repitió el experimento utilizando el detector SPA.

5.3. Respuestas en frecuencia obtenidas con el SPA

El experimento de control descrito anteriormente se realizó de la misma forma y para las mismas fibras, pero esta vez con el detector SPA, cuya lente tiene una apertura de 0.5 (30°) que es capaz de capturar prácticamente toda la potencia a la salida de la fibra. Estos resultados se muestran en la Figura 5.2.

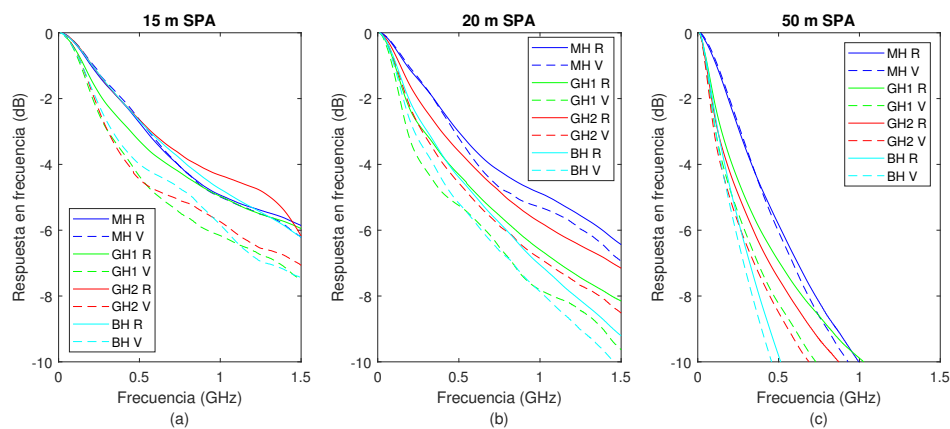


Figura 5.2: Comparación de respuestas en frecuencia SPA: (a) 15 m; (b) 20 m; (c) 50 m.

Al comparar las Figuras 5.1 y 5.2 se observa que las respuestas en frecuencia tomadas con el SPD son superiores a las tomadas con el SPA. Este efecto es producido por el filtrado espacial causado por la pequeña apertura del detector SPD que mejora la respuesta en frecuencia eliminando la potencia de los ángulos medios y altos que, a medida que siguen caminos más largos por el interior de la fibra, introducen retrasos mayores que degradan la respuesta en frecuencia [27]. El uso del SPA revela diferencias mayores entre ambas longitudes de onda para las fibras GH y BH, mientras que para la MH son similares a las obtenidas con el SPD, ya que, debido a su menor NA, ambos detectores son capaces de capturar la mayor parte de su potencia de salida. Para las fibras de alta apertura, GH y BH, de 50 metros, las diferencias entre las medidas con ambas fuentes se reducen y son similares a las obtenidas con el SPD porque el filtrado es menos efectivo ya que las distribuciones de potencia se encuentran más cerca del equilibrio.

5.4. Conclusiones

Para visualizar mejor los resultados obtenidos en las dos sesiones del experimento de control, en la Figura 5.3 se muestran los anchos de banda a 3 dB calculados a partir de todas las respuestas en frecuencia obtenidas.

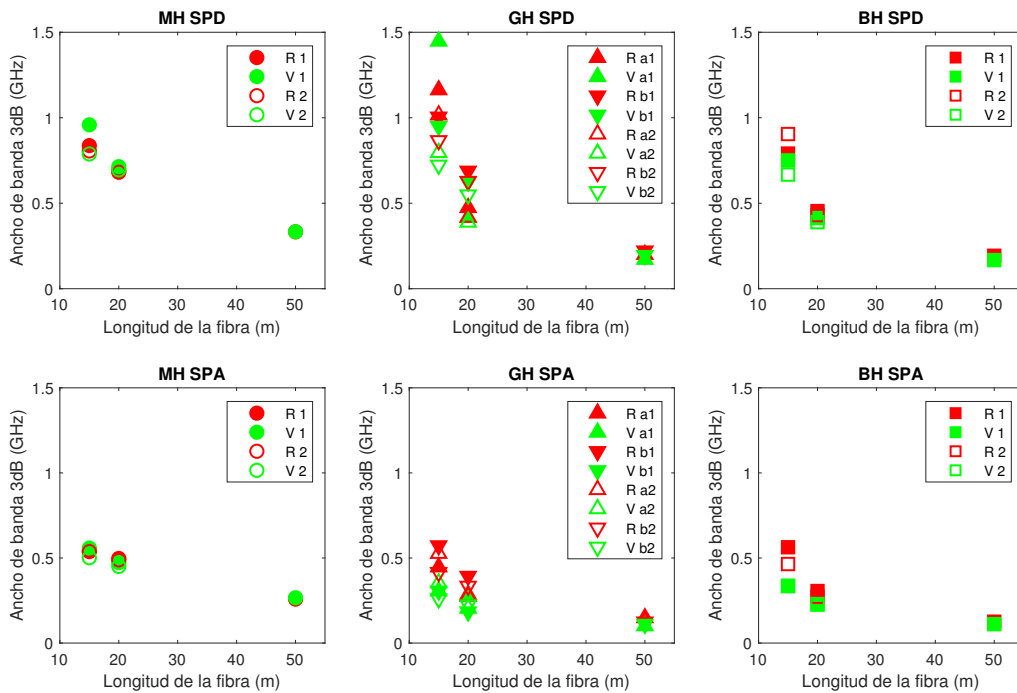


Figura 5.3: Comparación de anchos de banda a -3 dB.

Los resultados mostrados confirman que las propiedades de transmisión de las dos fibras de alta NA son mejores para luz roja y que las diferencias entre ambas longitudes de onda disminuyen con la longitud de la fibra. Estas características son consistentes con una dispersión modal mayor para 520 nm que para 650 nm. Una de las causas que dan lugar a la mayor dispersión modal puede ser el mayor número de modos que se propagan (N), ya que este número es inversamente proporcional a la longitud de onda (Ecuaciones 5.1 y Ecuación 5.2). En este caso, el número de modos que se propagan con 520 nm sería 1.6 veces mayor que con 650 nm.

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (5.1)$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} aNA \quad (5.2)$$

Por otra parte, la difusión que produce transferencia de potencia entre modos (acoplo modal) tiene también una dependencia con la longitud de onda consistente con los resultados. La difusión en fibras de PMMA se atribuye a los efectos de esparcimiento (*scattering*) de Rayleigh y Mie, que varían con λ^{-4} y λ^{-2} respectivamente, por lo que se espera que ambos efectos sean mayores para longitudes de onda más cortas [28, 29]. El mayor acoplo modal con luz de 520 nm produciría una mayor diferencia con 650 nm en longitudes cortas de fibra que tiende a reducirse en longitudes más largas al producirse una ecualización en los retardos.

Como evidencia de la dependencia de las condiciones de propagación por la fibra con la longitud de onda, en la Figura 5.4 se presentan las distribuciones de intensidad de uno de los ejes de los FFPs obtenidos para el mismo tramo de fibra, una GH de 10 metros, utilizando ambas fuentes.

Estas medidas se han obtenido sin utilizar el elemento vibrador descrito en el Anexo II ya que lo que se pretende es visualizar la presencia de ruido de moteado (*speckle*) y el vibrador se introduce para reducirlo. El ruido de moteado aparece cuando se usan fuentes coherentes como el diodo láser y, al propagarse por una fibra, da lugar al aspecto granulado en las imágenes del FFP como resultado de la interferencia entre los distintos modos. Por ello, cuando hay un mayor número de modos, se reduce el moteado [30]. Las imágenes muestran claramente una mayor presencia de ruido en la medida con 650 nm, que se puede ver más claramente comparando los cortes transversales de las dos imágenes. Así pues, estos resultados confirman el mayor número de modos

propagándose con longitudes de onda menores.

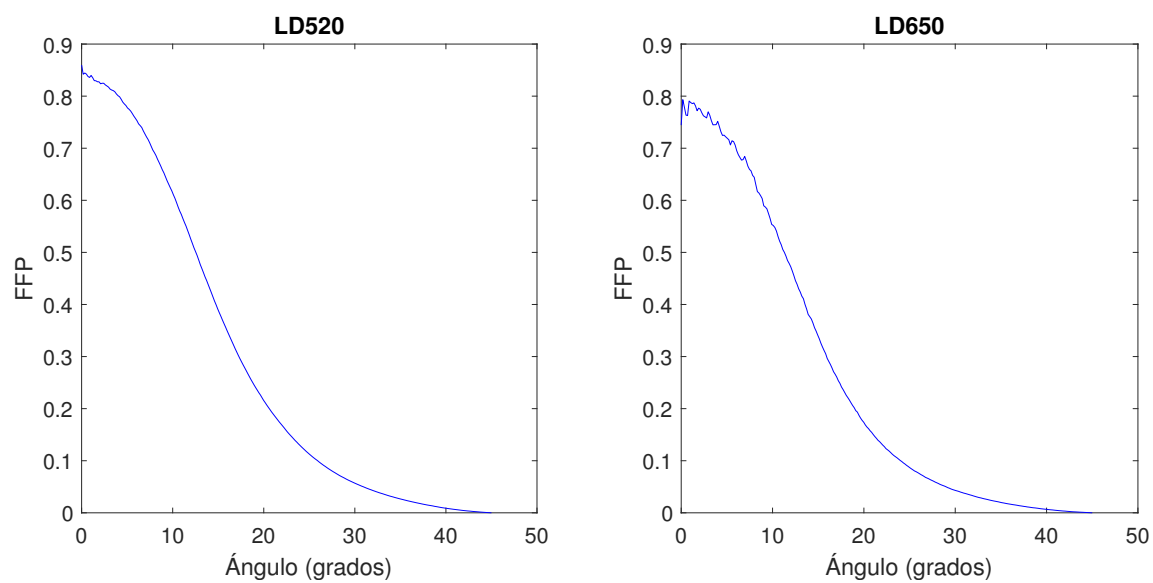


Figura 5.4: FFPs para un tramo de fibra GH de 10 metros: (a) LD520; (b) LD650.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se resumen las conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo y se proponen algunas líneas de continuación que han abierto los resultados obtenidos.

6.1. Conclusiones

La finalidad de este proyecto ha sido caracterizar las propiedades de transmisión de tres tipos de fibra de PMMA de 1 mm de núcleo y perfil de salto de índice con aperturas numéricas diferentes utilizando como fuente óptica un diodo láser que emite en 520 nm (verde).

Para determinar los parámetros de trabajo se han caracterizado previamente los dispositivos optoelectrónicos disponibles. Se han medido las curvas Intensidad-Potencia de las dos fuentes de transmisión: LD520 y LD650 y se ha determinado la potencia de saturación de los detectores SPD y SPA para longitud de onda de 520 nm.

En base a medidas frecuenciales se ha seleccionado el punto de operación de los láseres: 80 mA para el LD520 y 35 mA para el LD650 y el SPD como detector y se ha diseñado un protocolo de medida, basado en el método de corte, en el que a partir de una longitud larga de fibra se van cortando tramos de distinta longitud hasta alcanzar 1 metro. La inyección se ha mantenido fija a lo largo de todo el experimento obteniendo medidas de potencia, de respuesta en frecuencia y de BER frente a la tasa de transmisión para un rango de longitudes de fibra. Además, se ha realizado un experimento de control para cuantificar las diferencias en las respuestas en frecuencia obtenidas utilizando dos longitudes de onda diferentes: 520 nm y 650 nm.

Los parámetros de transmisión en función de la longitud de fibra obtenidos para los tres tipos de fibra permiten determinar los entornos de aplicación más adecuados para cada una de ellas. En primer lugar, utilizando luz de 520 nm, todas las fibras analizadas pueden transportar datos Fast-Ethernet en longitudes de 100 metros, lo cual cumple con las exigencias para entornos industriales. La menor apertura de la fibra MH, que implica menor dispersión modal, permite alcanzar tasas de bit más altas que con cualquiera de las otras fibras de mayor apertura. Por ello, la fibra MH es adecuada para enlaces de alta capacidad requeridos en redes domésticas y en medios de transporte ya que es compatible con Gigabit-Ethernet hasta los 50 metros. La fibra BH muestra un buen rendimiento en 520 nm, alcanzando velocidades de transmisión superiores a 1 Gbps en 20 metros lo que permite su uso en aquellas aplicaciones de corto alcance en las que sea necesaria su resistencia a la temperatura. Además, su menor atenuación para luz verde la hace adecuada para el despliegue de redes de comunicación en aviones donde la presencia de un gran número de conectores unida a distancias relativamente largas requieren un amplio balance de potencia [26, 31]. Con la fibra GH se han conseguido buenas prestaciones, aunque debido a las condiciones de inyección del experimento de corte, los resultados han sido peores de lo esperado. En cualquier caso, la baja atenuación en 520 nm hace posible su aplicación en redes de mayor alcance (hasta 150 metros) que con 650 nm. Para longitudes de enlace hasta 50 metros, nuestros resultados muestran mejores prestaciones en 650 nm.

Comparando los resultados extraídos de las medidas tomadas para luz verde con los obtenidos para luz roja se confirma la menor atenuación de las fibras de PMMA de salto de índice en la longitud de onda de 520 nm. De hecho, el valor más bajo de atenuación encontrado es de 0.09 dB/m en esta longitud de onda para las fibras de mayor apertura numérica, GH y BH. La atenuación en 520 nm obtenida para la MH es menor que la nominal en 650 nm pero bastante mayor que para las fibras de alta apertura (0.15 dB/m). Por otro lado, los resultados sugieren que la luz verde introduce una mayor dispersión modal, atribuible al mayor número de modos que se transmiten y a una mayor difusión, consistente con su dependencia de la longitud de onda. Sin embargo, su impacto sobre el ancho de banda de la fibra es poco significativo en longitudes de fibra mayores de 50 metros y comparable o menor que la variabilidad en longitudes más cortas. En base a esto, se concluye que el uso de fuentes ópticas que emiten luz en el rango del verde es particularmente interesante para enlaces en los que una atenuación baja es crucial, mientras que el ancho de banda no es mucho menor que el medido con fuentes equivalentes cuya emisión se encuentra en la región del rojo.

6.2. Líneas futuras

El análisis de las propiedades de transmisión de la SI-POF con fuentes ópticas con emisión en la región del verde sirve como punto de partida de distintas líneas de investigación del grupo de POF.

Por un lado, las conclusiones extraídas de este trabajo servirán para proponer un modelo matricial para SI-POF con luz verde similar al que ya se ha diseñado para luz roja, utilizando los resultados experimentales obtenidos para ajustar los parámetros característicos de dicho modelo. De hecho, las medidas obtenidas para las fibras BH y MH se han enviado ya al grupo de POF del *College of Staten Island de la City University of New York (CUNY)* para que comiencen a trabajar en el desarrollo de algoritmos para la obtención de dichos parámetros.

También sería interesante realizar la caracterización completa de las propiedades de transmisión utilizando la inyección indirecta mediante el rabillo de lanzadera. Aunque con el rabillo se obtienen en general menores anchos de banda, hemos visto que permite igualar las condiciones de inyección por lo que se tendría una mejor comparación entre los distintos tipos de fibra.

Además, la metodología diseñada durante el desarrollo de este trabajo, se puede aplicar en la caracterización de las propiedades de transmisión de POFs en otras longitudes de onda. Sería interesante, por ejemplo, obtener la caracterización con fuentes en la región del azul.

Por otra parte, el conocimiento de las propiedades de transmisión de las fibras es fundamental para seleccionar los parámetros óptimos de trabajo de los dispositivos activos involucrados en un sistema de comunicaciones. Por ejemplo, el desarrollo de detectores con mayor responsividad en el verde permitiría aumentar aún más la longitud de enlace o utilizar láseres de menor potencia. Permitirá también diseñar una configuración óptima para cada longitud de enlace con el objetivo de introducir formatos de modulación con el objetivo de aumentar la eficiencia espectral, así como técnicas de ecualización y técnicas FEC que posibilitarían ampliar aún más la capacidad de los enlaces con SI-POFs.

Bibliografía

- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow, and W. Daum. *POF handbook: Optical short range transmission systems*. Springer, 2nd edition, January 2008.
- [2] A. Grzemba. *MOST: the automotive multimedia network*. Franzis Verlag, 2011.
- [3] Homefibre Digital Network GmbH. <https://www.homefibre.at/en>, Sept 2021.
- [4] KD-POF. <https://www.kdpof.com/#home-soho/home-wi-fi>, Sept 2021.
- [5] T. K. Truong. Commercial airplane fibre optics: needs, opportunities, challenges. In *International Conference on Plastic Optical Fibres and Application, POF, Tokyo, Japan; pp. DN2-1-M*, 2010.
- [6] N. Villar. Análisis de la influencia de la inyección en las propiedades de transmisión de fibras de plástico de gradiente de índice (GI-POF). Trabajo Fin de Grado, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2020.
- [7] A. López, N. Villar, M. A. Losada, E. Laporta, and J. Mateo. Experimental Characterization of the Transmission Properties of Large-Core Graded-Index PMMA Fibers. In *2020 22th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, July 19-23, 2020*.
- [8] A. López, S. Ramón, M. Chueca, M. A. Losada, F. A. Domínguez-Chapman, and J. Mateo. Experimental Characterization of Transmission Properties in Multi-Core Plastic Optical Fibers. In *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Trento, Italy, 2016*.
- [9] S. Serón. Caracterización individualizada de las propiedades de transmisión de los núcleos en fibras ópticas de plástico multinúcleo (MC-POF). Trabajo Fin de Grado, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2021.

- [10] J. A. Altabás, D. Izquierdo, A. López, M. A. Losada, J. Clemente, S. Sarmiento, J. Mateo, J. A. Lázaro, and I. Garcés. Experimental demonstration of multiband CAP modulation for SI-POF links. In *27th International Conference on Plastic Optical Fibres and Application, POF, Seattle (US)*, 2018.
- [11] R. Kruglov, S. Loquai, J. Vinogradov, O. Ziemann, C. A. Bunge, G. Bruederl, and U. Strauss. 10.7 Gb/s WDM Transmission over 100-m SI-POF with Discrete Multitone. 2016.
- [12] R. Kruglov, J. Vinogradov, and O. Ziemann. Gigabit Transmission Over Standard POF Beyond 50-m. In *27th International Conference on Plastic Optical Fibres and Application, POF, Seattle (US)*, 2018.
- [13] Mitsubishi Chemical. Eska. Polymer Optical Fiber. <https://www.pofeska.com/>, Sept 2021.
- [14] S. Ramón. Medida de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de múltiples núcleos mediante un analizador de redes vectorial. Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2015.
- [15] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, and J. Zubía. Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers. *Opt. Express*, 14(20):9028–9035, Oct 2006.
- [16] P. Heredia. Estudio de la capacidad de transmisión de las fibras ópticas de plástico de gran núcleo en aplicaciones en el hogar. Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Julio 2008.
- [17] D. Richards, A. López, M. A. Losada, P. V. Mena, E. Ghillino, J. Mateo, N. Antoniadis, and X. Jiang. Overcoming Challenges in Large-Core SI-POF-Based System-Level Modeling and Simulation. *Photonics*, 6(3), 2019.
- [18] K. Koike and Y. Koike. Design of low-loss graded-index plastic optical fiber based on partially fluorinated methacrylate polymer. *J. Lightwave Technol.*, 27(1):41–46, Jan 2009.
- [19] A. López, M. A. Losada, and J. Mateo. «Polymer Optical Fibers, POF». *Optical And Microwave Telecommunications Networks, John Wiley & Sons*, pages 306–327, 2016.

- [20] C. Muzás. Realización de un atenuador variable para fibras ópticas de plástico controlado por ordenador. Trabajo Fin de Grado, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2021.
- [21] A. López, M. A. Losada, J. Mateo, and J. Zubía. On the Variability of Launching and Detection in POF Transmission Systems. In *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, July 1-5, 2018*.
- [22] D. Espinosa. Desarrollo de un sistema automático de captación y análisis de imágenes de la distribución de campo lejano de fibras ópticas. Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Dic 2004.
- [23] M. Osta. Análisis de los efectos de un scrambler sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico de salto de índice mediante el modelo matricial de propagación. Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Mayo 2010.
- [24] M. Kagami, A. Kawasaki, M. Yonemura, M. Nakai, P. V. Mena, and D. R. Selviah. Encircled Angular Flux Representation of the Modal Power Distribution and Its Behavior in a Step Index Multimode Fiber. *J. Lightwave Technol.*, 34(3):943–951, Feb 2016.
- [25] M. Mazo, M. A. Losada, C. Muzás, A. López, and J. Mateo. Caracterización de una fibra óptica de plástico de salto de índice (SI-POF) de baja apertura numérica con luz de 520 nm. *Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL*, Julio 2021.
- [26] A. López, M. A. Losada, J. Mateo, X. Jiang, D. H. Richards, and N. Antoniadis. Transmission Performance of Plastic Optical Fibers Designed for Avionics Platforms. *J. Lightwave Technol.*, 36(21):5082–5088, Nov 2018.
- [27] J. Mateo, M. A. Losada, and J. Zubia. Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation. *Opt. Express*, 17(4):2850–2860, Feb 2009.
- [28] C. A. Bunge, R. Kruglov, and H. Poisel. Rayleigh and mie scattering in polymer optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 24(8):3137, Aug 2006.
- [29] I. Bikandi, M. A. Illarramendi, G. Durana, G. Aldabaldetrekú, and J. Zubia. Spectral dependence of scattered light in step-index polymer optical fibers by

side-illumination technique. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4539–4543, 2014.

- [30] L. Rodriguez-Cobo, M. Lomer, C. Galíndez, and J.M. López-Higuera. Speckle characterization in multimode fibers for sensing applications. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8413, 09 2012.
- [31] D. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos. Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System. *Journal of Lightwave Technology*, 31(3):468–476, Feb 2013.

Anexos

Anexo I

Preparación y verificación de fibras

En este anexo se detalla la preparación de las fibras de plástico antes de ser utilizadas y la verificación de las mismas para asegurar que se comportan correctamente.

I.1. Preparación de los extremos de POF

Un paso fundamental a realizar cuando se trabaja con fibra de plástico es la preparación de los extremos para disminuir las irregularidades que pueda tener la superficie mediante el corte, pelado y pulido de los mismos.

Existen varias cortadoras de POF, que se muestran en la Figura I.1, cada una con sus particularidades. Una vez se realiza el corte, el recubrimiento de la fibra se retira con una peladora similar a la mostrada en la Figura I.2 (*Micro-Strip™*).



(a) Metálica.



(b) Metálica profesional.



(c) Plástico desechable.

Figura I.1: Cortadoras específicas para POF.

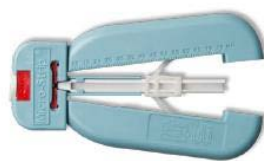


Figura I.2: Peladora Micro-strip para POF.

Por último, para pulir el extremo de la fibra hay que realizar unos 30 giros en forma de ocho sujetando la fibra perpendicularmente con un disco de soporte, como se muestra en la Figura I.3. Se realiza normalmente sobre una base de vidrio donde se apoyan dos lijas de espesores diferentes, mostradas en la Figura I.4, impregnadas en líquido de pulido (polishing slurry). Primero se utiliza la de grano grueso (2000-grit polishing paper) y después la de grano fino (3 um polishing paper).

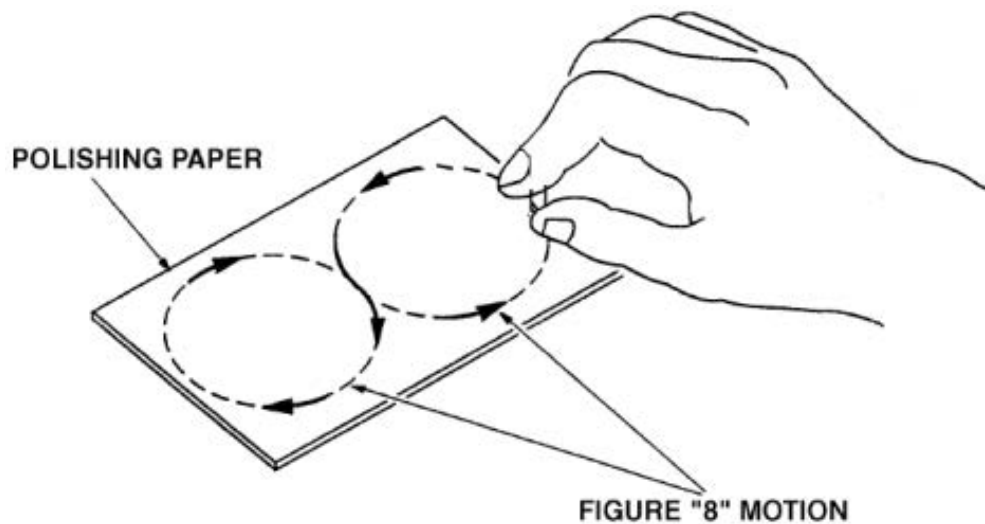


Figura I.3: Proceso de pulido de un extremo de fibra.

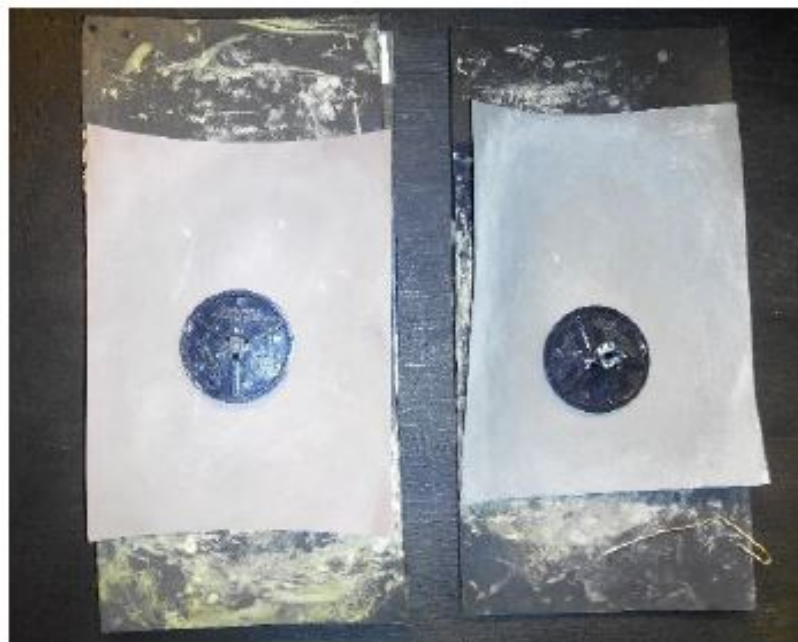


Figura I.4: Discos de soporte y papeles de lija de espesores diferentes.

I.2. Verificación de fibras

Antes de comenzar un experimento es recomendable comprobar que las fibras seleccionadas estén en buen estado para evitar errores de medida o resultados inesperados. Para ello, se utiliza un Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR). El OTDR es un instrumento que permite determinar la traza de una fibra y obtener su longitud y atenuación para una longitud de onda dada (en este caso, en la región del rojo, 630 nm). A partir de los eventos presentes en la traza obtenida se puede determinar la presencia de empalmes, conectores, roturas de la fibra, etc.

En este Anexo se muestran las trazas del OTDR para los tres tipos de fibra caracterizados en este trabajo.

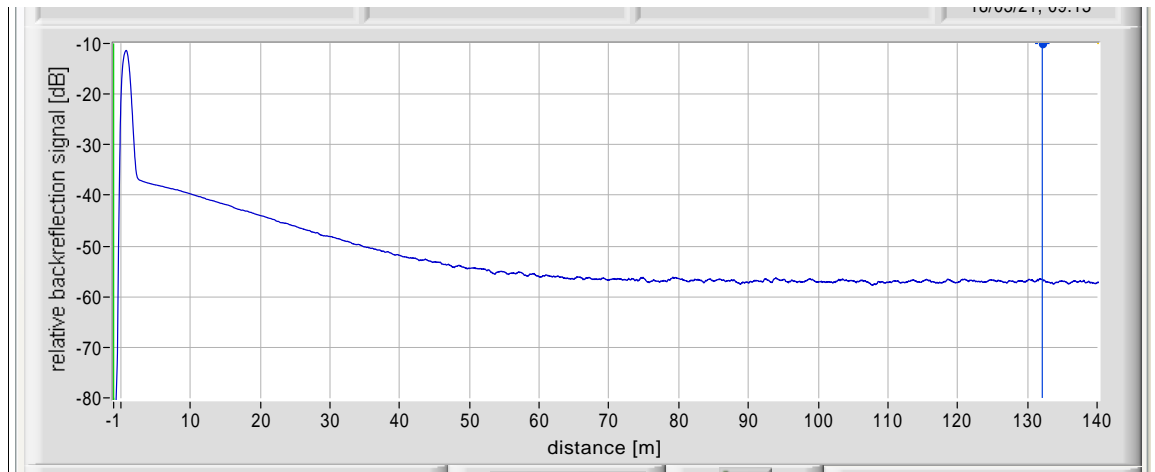


Figura I.5: Traza del OTDR para 130 metros de fibra MH-4001.

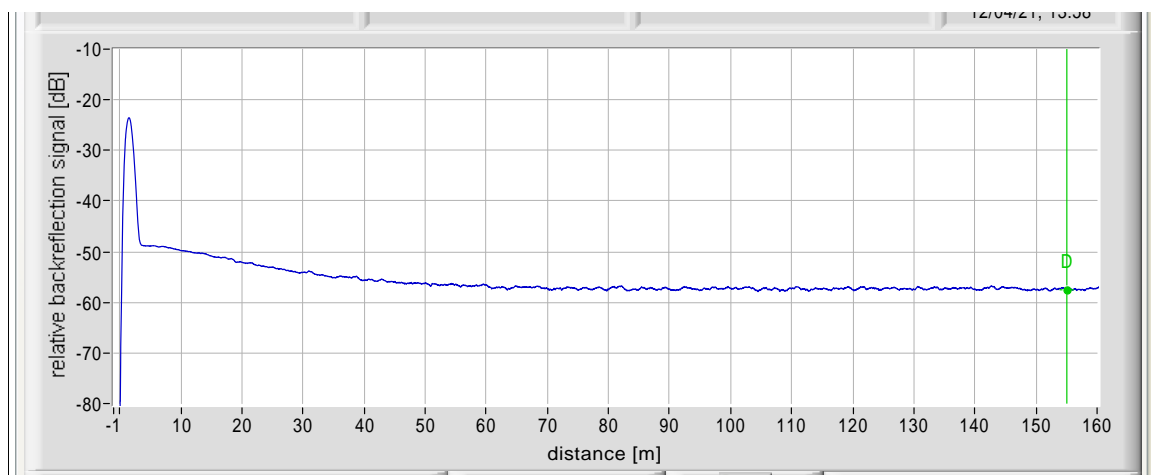


Figura I.6: Traza del OTDR para 150 metros de fibra GH-4002 (tramo 1).

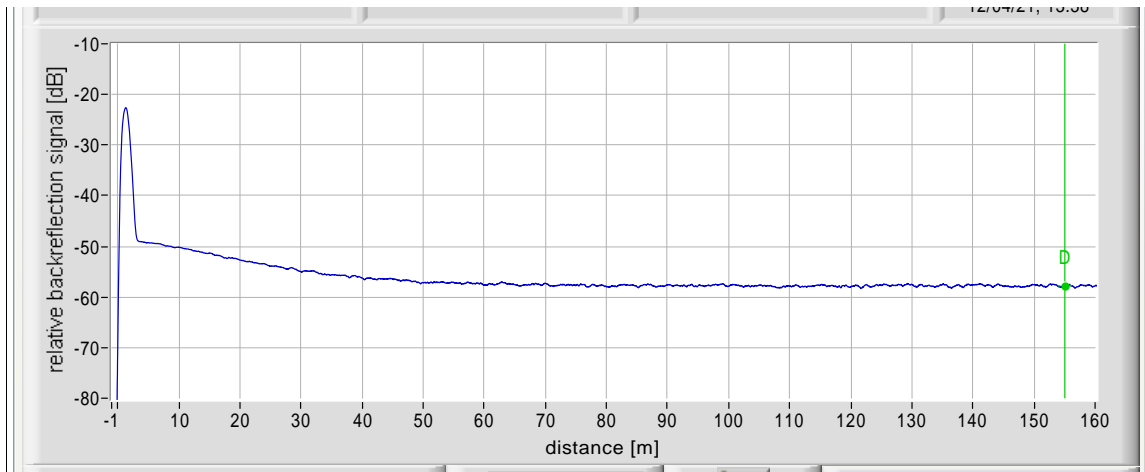


Figura I.7: Traza del OTDR para 150 metros de fibra GH-4002 (tramo 2).

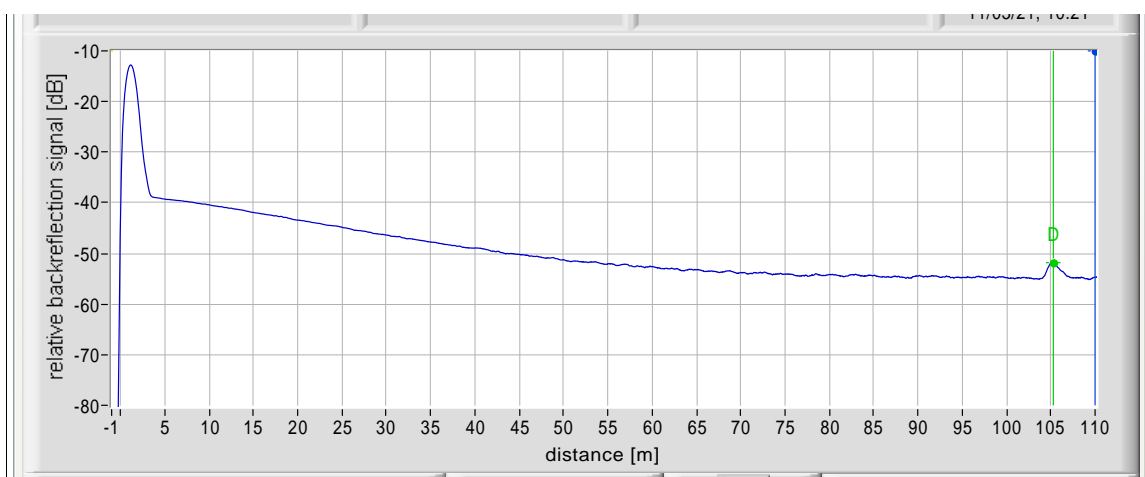


Figura I.8: Traza del OTDR para 100 metros de fibra BH-4001.

Anexo II

Sistemas experimentales

En este anexo se describen los montajes experimentales utilizados y se explica el manejo de software de control de aquellos que lo requieren.

II.1. Montaje experimental para fibra dúplex

En la Figura II.1 se muestra el montaje experimental utilizado para realizar el experimento de corte de la fibra GH dúplex. La única diferencia al descrito en la Figura 3.1 es que, en este caso, se tienen dos fuentes de transmisión: el diodo láser LD520 (verde) y el LD650 (rojo).

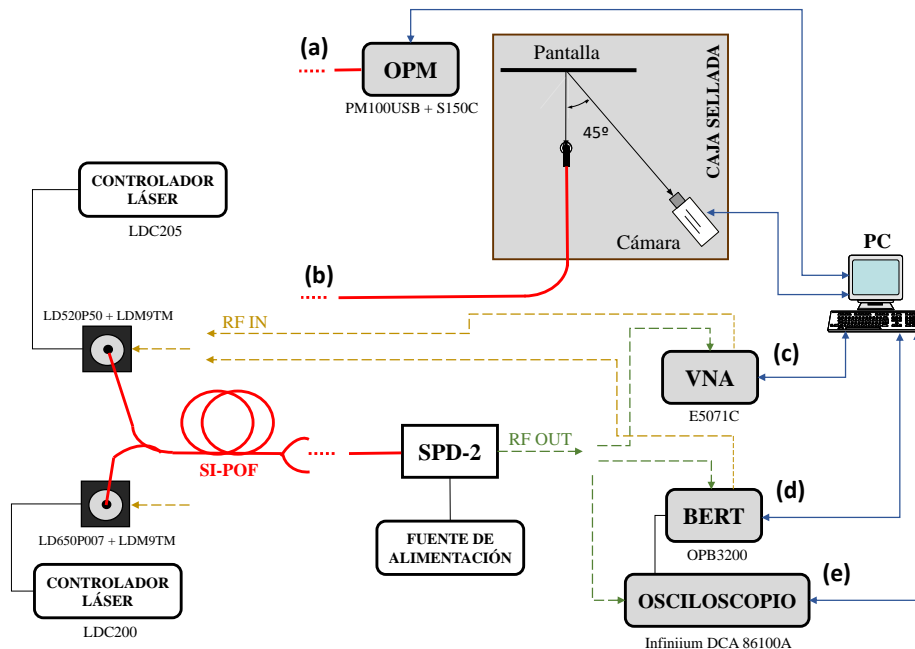


Figura II.1: Sistema experimental dúplex para obtener: (a) potencia óptica recibida; (b) imágenes FFP; (c) parámetro de transmisión S_{21} ; (d) BER; (e) diagramas de ojo.

II.2. Medida de patrón de campo lejano (FFP)

El patrón de campo lejano (FFP) se mide para caracterizar la distribución espacial de intensidad. El montaje experimental se muestra en la Figura II.2 y se encuentra en el interior de una caja sellada. Consiste en una cámara conectada a un ordenador que apunta con un ángulo de 45 grados a una pantalla en blanco, cuyo objetivo es reflejar el haz de luz emitido por el extremo de salida de la fibra (situado a una distancia conocida de esta pantalla). Para evitar y promediar el ruido granular que producen las fuentes ópticas, se utiliza un vibrador que cambia ligeramente la posición del haz de luz en la pantalla. Con esto se consiguen medidas más suavizadas.

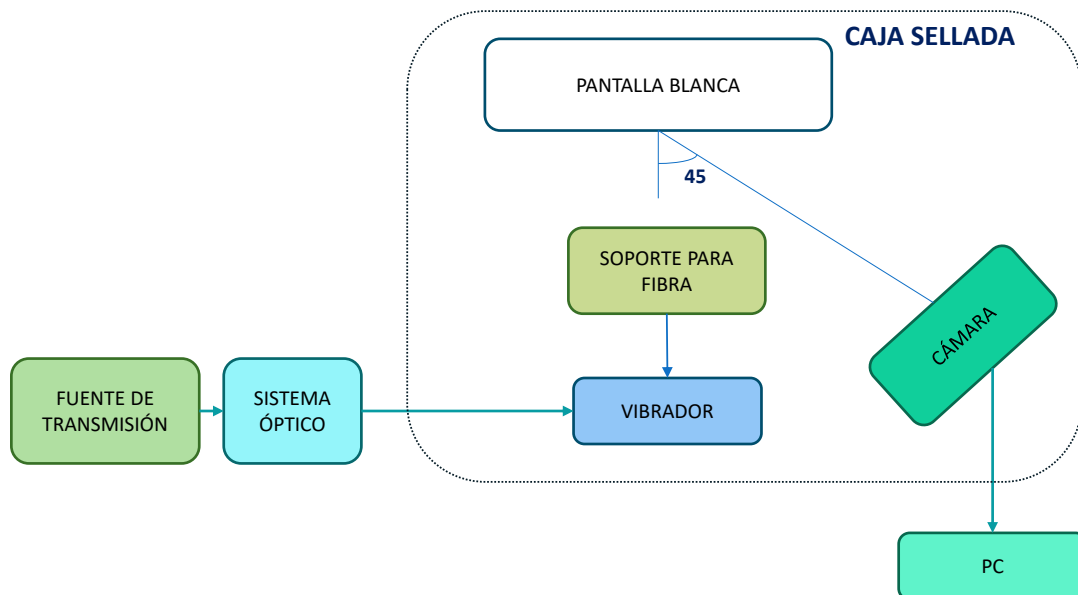


Figura II.2: Montaje experimental para la medida de FFPs.

Las imágenes recogidas por la cámara se procesan con un programa desarrollado en LabView. La interfaz de este programa (Figura II.3) muestra, en la parte superior izquierda, la imagen captada por la cámara para un ángulo de 0 grados, y su perfil radial (valor máximo en rojo, promedio en blanco y valor mínimo en verde) en la parte superior izquierda. Permite seleccionar el número de imágenes que se desean guardar y controlar algunos parámetros de posición importantes para alinear de forma correcta la fibra frente a la pantalla y el tiempo de exposición, para obtener una buena amplitud del FFP medido.

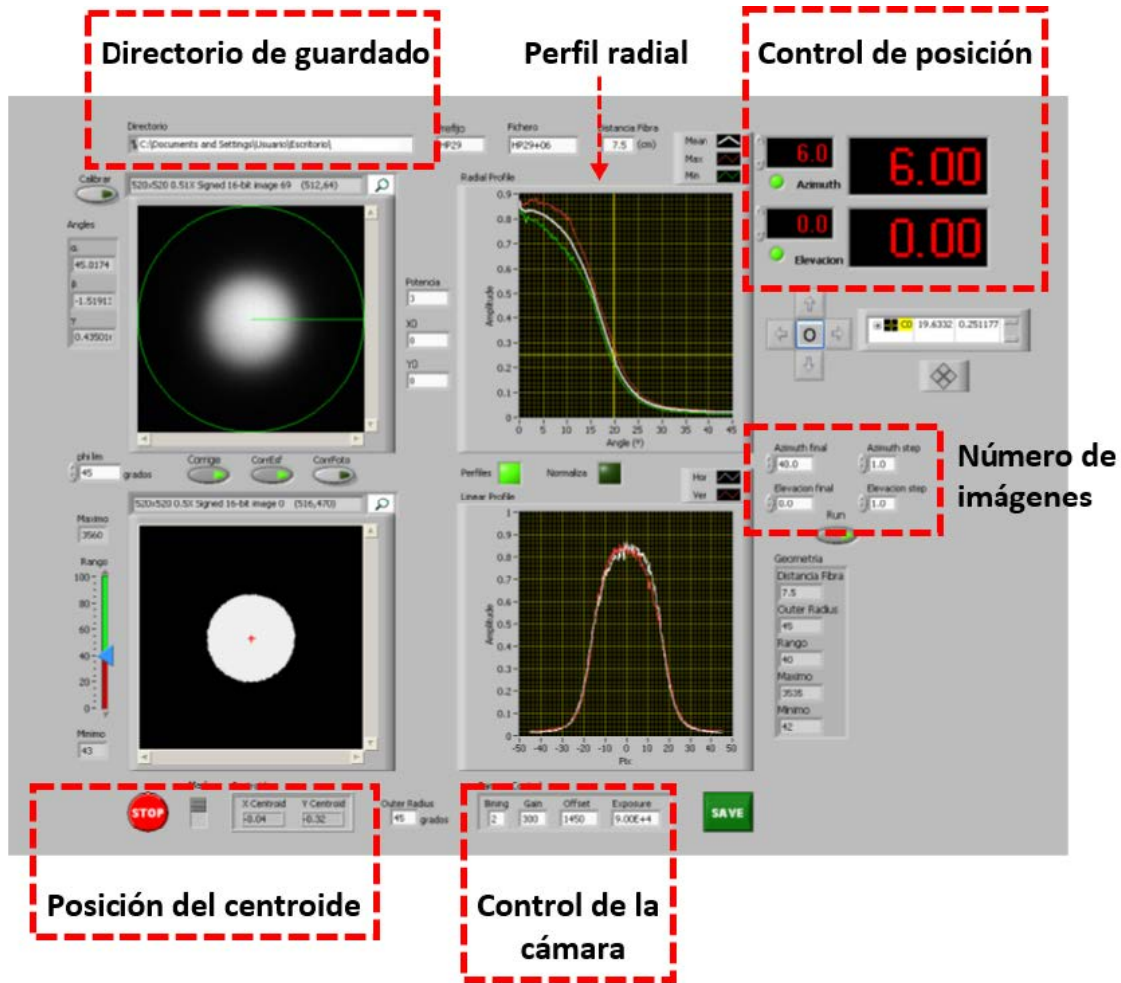


Figura II.3: Software de control para la medida de FFPs.

II.3. Parámetro de transmisión S_{21}

Un sistema óptico puede ser considerado como una red de dos puertos, siendo el puerto 1 la entrada y el puerto 2 la salida, por lo que su respuesta frecuencial puede obtenerse a partir del parámetro de transmisión S_{21} . Este parámetro mide la proporción de señal en el puerto de salida con respecto a la señal presente en el puerto de entrada.

El montaje experimental que se utiliza para medir el parámetro S_{21} es el mostrado en la Figura II.4. El principal equipo de medida que lo compone es un analizador de redes vectoriales (VNA) que abarca un rango de frecuencias entre 9 kHz y 4.5 GHz.

Las respuestas en frecuencia obtenidas a partir de los S_{21} medidos incluyen las limitaciones introducidas por el sistema (emisor-receptor). Para despreciar sus efectos se toma una medida de referencia del sistema utilizando un rabillo de fibra muy corto (1 metro) de forma que así se mide únicamente la respuesta del sistema.

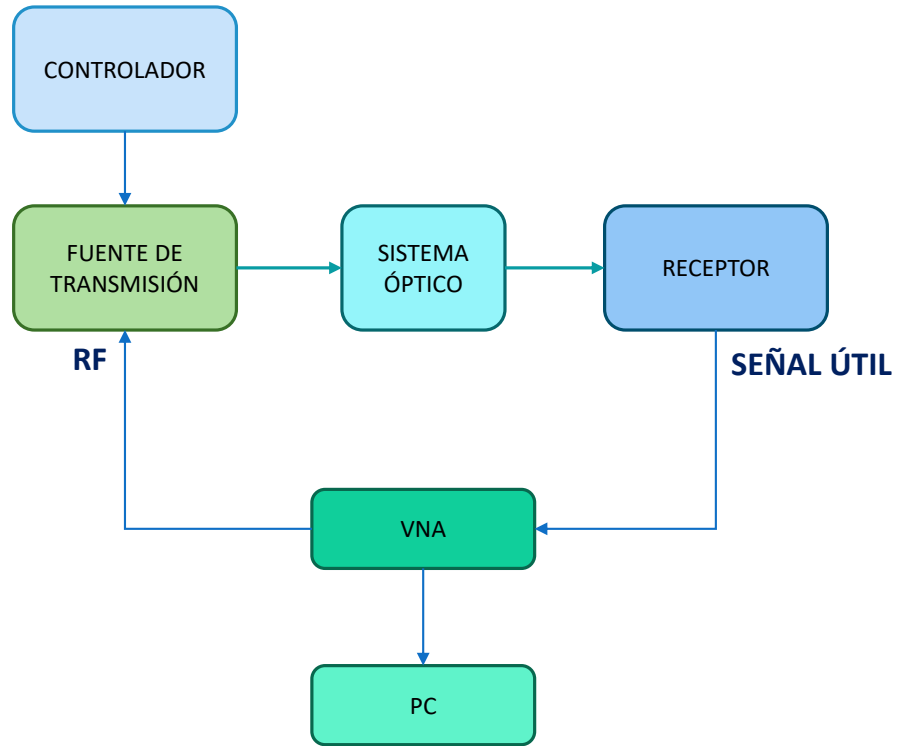


Figura II.4: Montaje experimental para la medida del parámetro S_{21} .

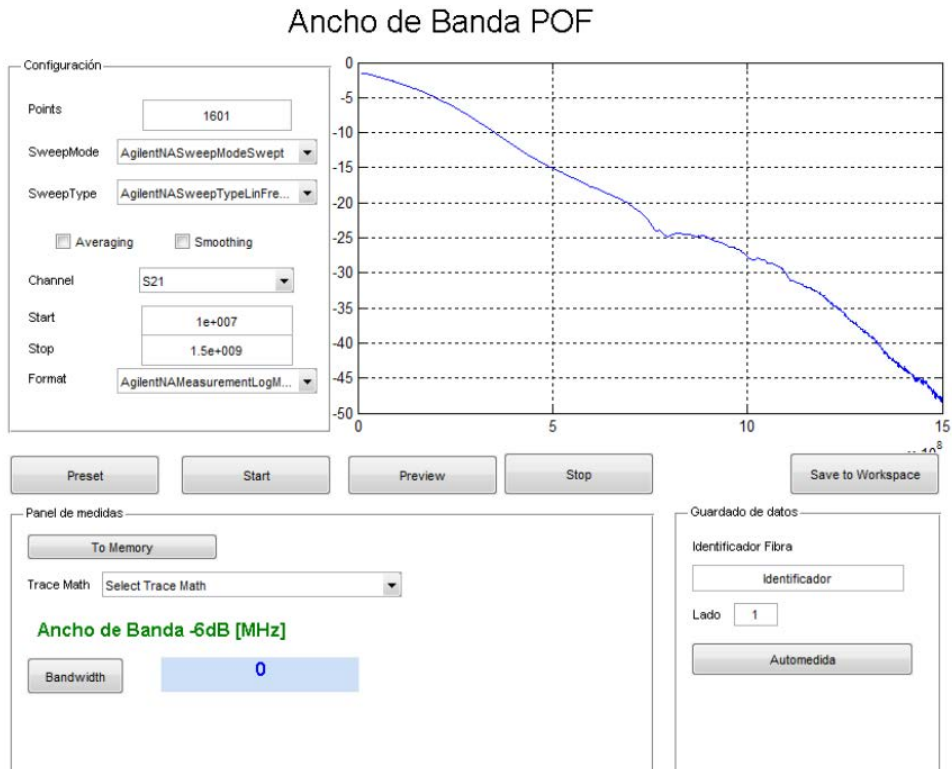


Figura II.5: Software de control para la medida del S_{21} .

Los parámetros de configuración óptimos para la medida del parámetro S_{21} se muestran en la Tabla II.1.

Parámetro	Valor
Número de puntos	1601
Frecuencia inicial	10 MHz
Frecuencia final	4.5 GHz
Potencia RF	-10 dBm
Ancho de banda del filtro IF	1 kHz
Promediado (AV)	48

Tabla II.1: Parámetros de configuración óptimos para la medida del S_{21} .

II.4. BER vs. Tasa de transmisión

La tasa de error de bit es un parámetro muy importante a la hora de conocer la capacidad de transmisión de una red de comunicaciones. Define el porcentaje de bits que se reciben de forma errónea en el receptor tras una determinada configuración en la comunicación. El montaje experimental utilizado para tomar estas medidas se muestra en la Figura II.6

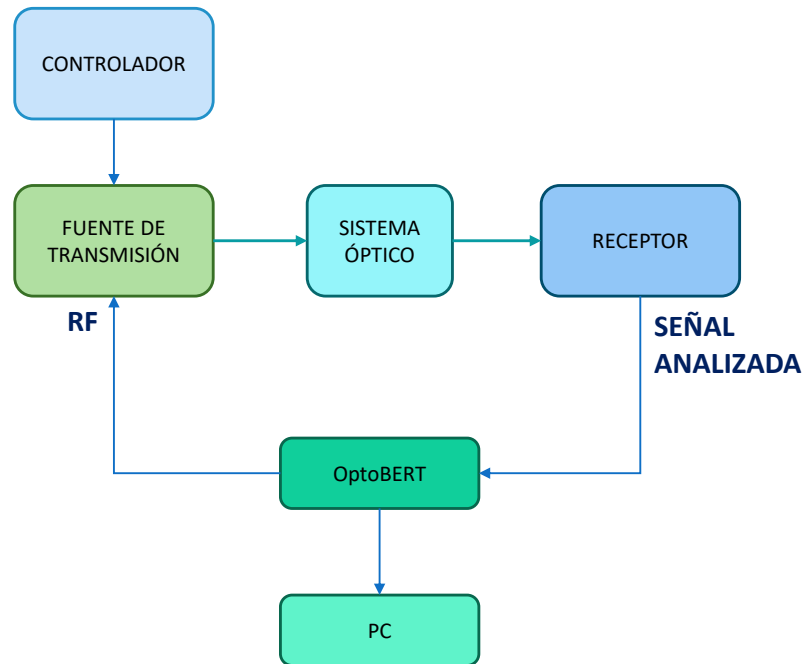


Figura II.6: Montaje experimental para la medida de BER.

Para medir el BER se utiliza un programa desarrollado en LabView, con el cual se pueden realizar tanto medidas puntuales como barridos en función de la tasa de bit, para los cuales es posible fijar la tasa inicial, la tasa final, y el paso. En la Figura II.7 se muestra el software de control. En la parte superior de la interfaz se puede seleccionar el patrón de datos que se desea transmitir y modificar la tasa de transmisión. En la parte inferior se muestran los resultados de BER de forma gráfica y numérica.

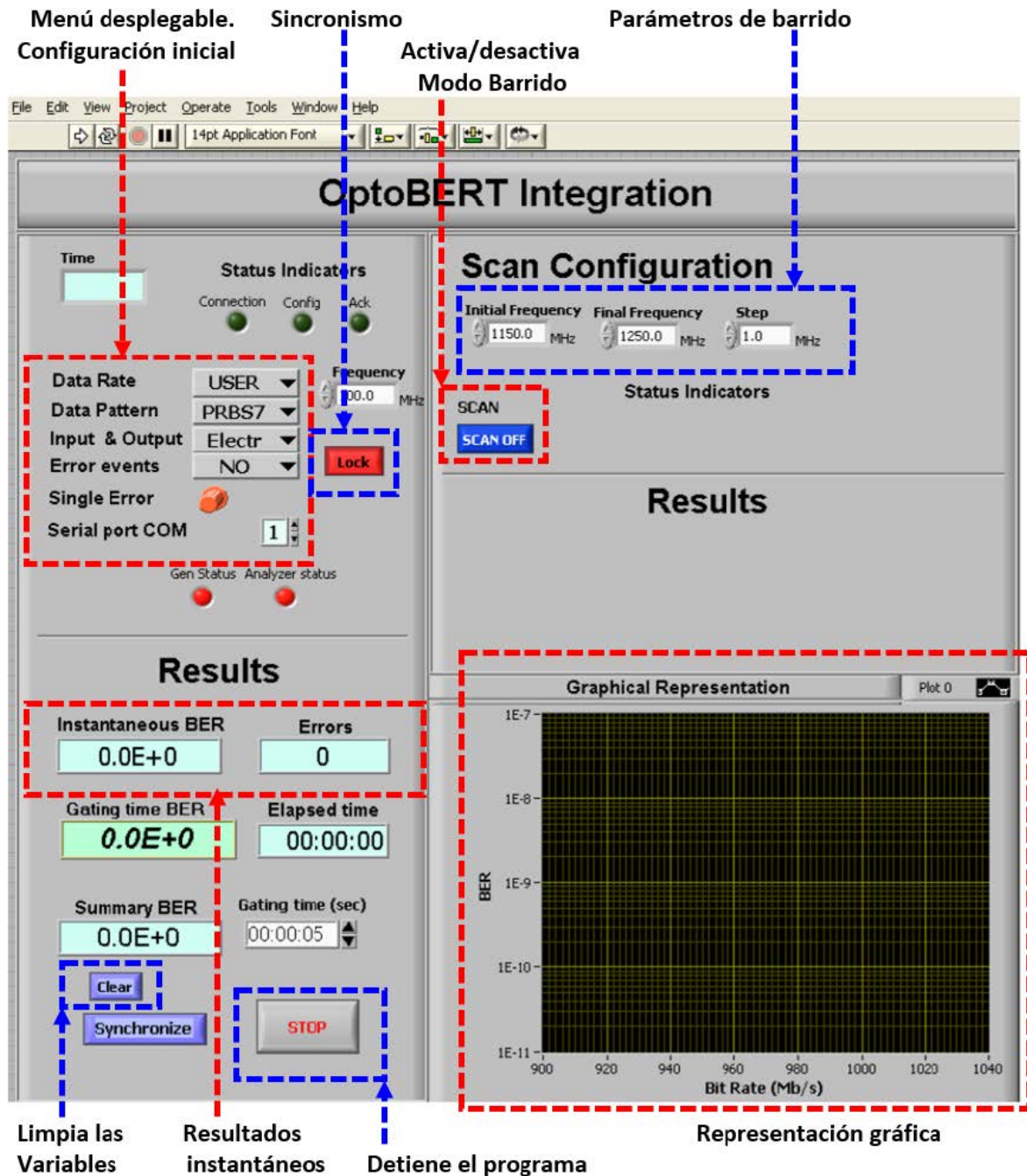


Figura II.7: Software de control para la medida de BER.

II.5. Medida de patrón de campo cercano (NFP)

Las imágenes de patrón de campo lejano (NFP), tomadas con el esquema de la Figura II.8, se utilizan para determinar los parámetros geométricos de la fibra: perfil de índice, tamaño del núcleo, tamaño del recubrimiento, etc.

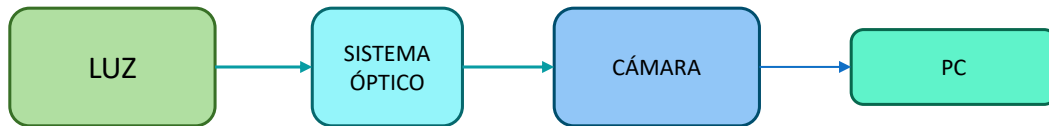


Figura II.8: Montaje experimental para la medida de NFP.

Anexo III

Caracterización de dispositivos

En este anexo se incluyen las medidas realizadas para caracterizar algunos de los elementos utilizados en este trabajo: fuentes de transmisión, detectores y acopladores.

III.1. Caracterización de las fuentes de emisión

III.1.1. Curva Intensidad-Potencia

Se han caracterizado los dos diodos láser utilizados como fuente de emisión a lo largo de este trabajo. Para ello, se midieron sus curvas Intensidad-Potencia, mostradas en las Figuras III.1 y III.2 gracias a las que se determinó su intensidad umbral. Esto fue muy útil a la hora de seleccionar el rango de posibles intensidades de polarización.

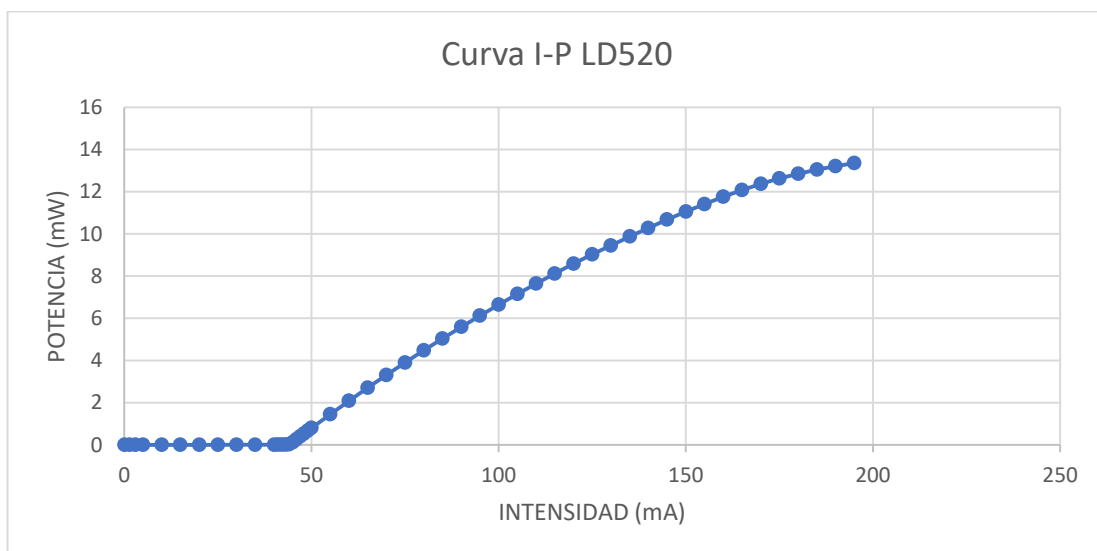


Figura III.1: Curva Intensidad-Potencia LD520.

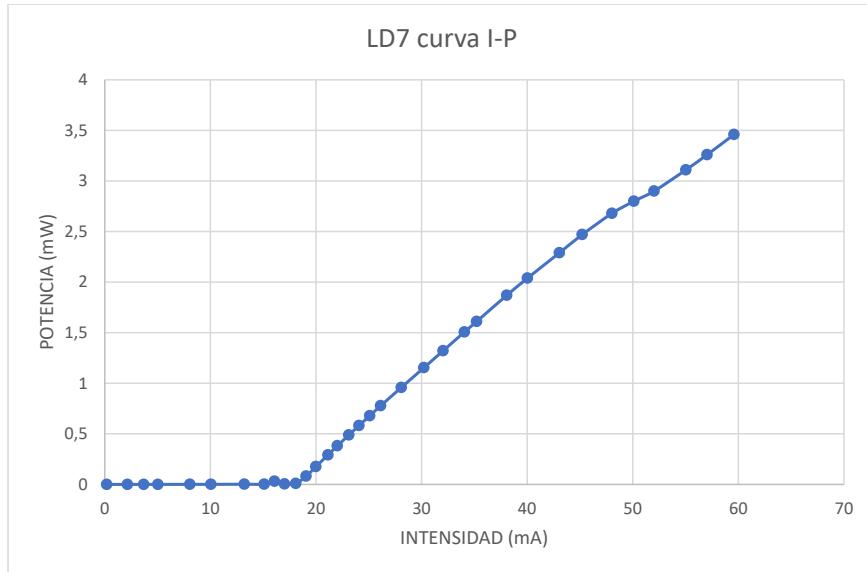


Figura III.2: Curva Intensidad-Potencia LD650.

III.2. Caracterización de los detectores

III.2.1. Curva Potencia-Voltaje

Un parámetro interesante a la hora de caracterizar un detector es su potencia de saturación. Para determinarla es necesario medir su curva Potencia-Voltaje (Figura III.3). En este caso, se ha medido utilizando como transmisor el diodo láser LD520.

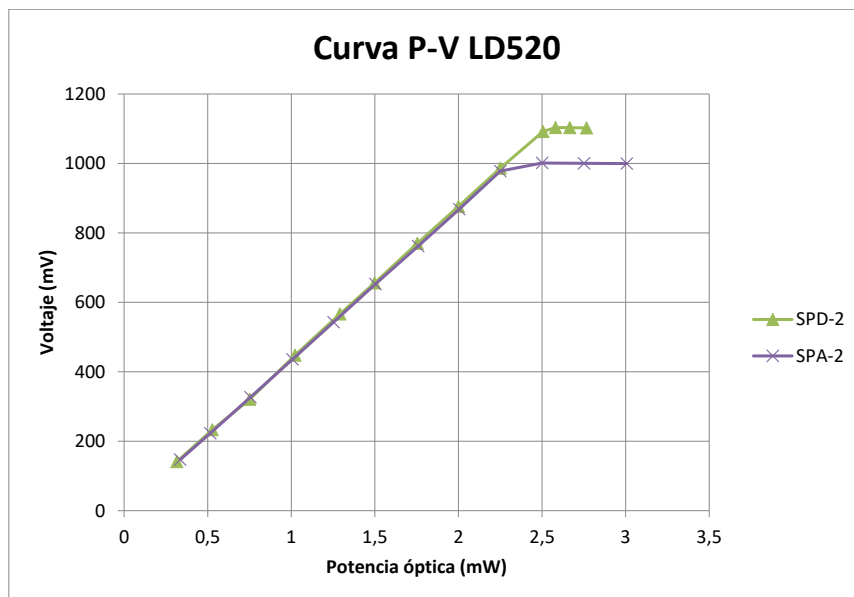


Figura III.3: Curva Potencia-Voltaje LD520 para los dos detectores.

III.2.2. Distorsión armónica (THD)

La distorsión armónica total (*Total Harmonic Distortion*, THD) es una medida cuantitativa de la distorsión que sufre la forma de onda de una senoide convencional a medida que atraviesa el sistema. Dicha distorsión se produce principalmente en múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la portadora, conociéndose como armónicos, y es causada por la mayoría de cargas no lineales presentes en el sistema. Estos armónicos se suman a la onda fundamental distorsionándola y generando así la llamada distorsión armónica. La THD se ha obtenido para el LD520 y el detector SPD y se muestra en la Figura III.4.

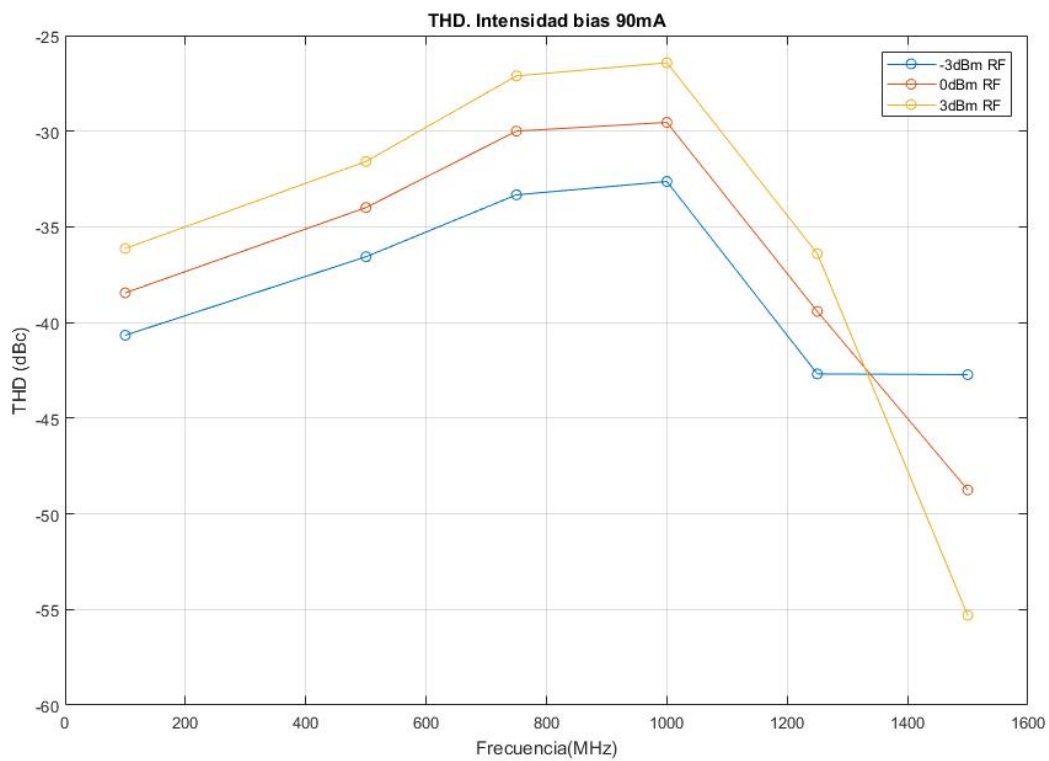


Figura III.4: Distorsión armónica LD520-SPD.

III.2.3. Respuesta en frecuencia

Para seleccionar los parámetros óptimos de trabajo, se probaron varias combinaciones fuente-detector para varias intensidades de polarización y potencias de RF. Estas respuestas en frecuencia fueron tomadas y calculadas utilizando los sistemas experimentales que se explican a lo largo de este trabajo. La fuente de transmisión fue el LD520 y se utilizó el acoplador IF-562.

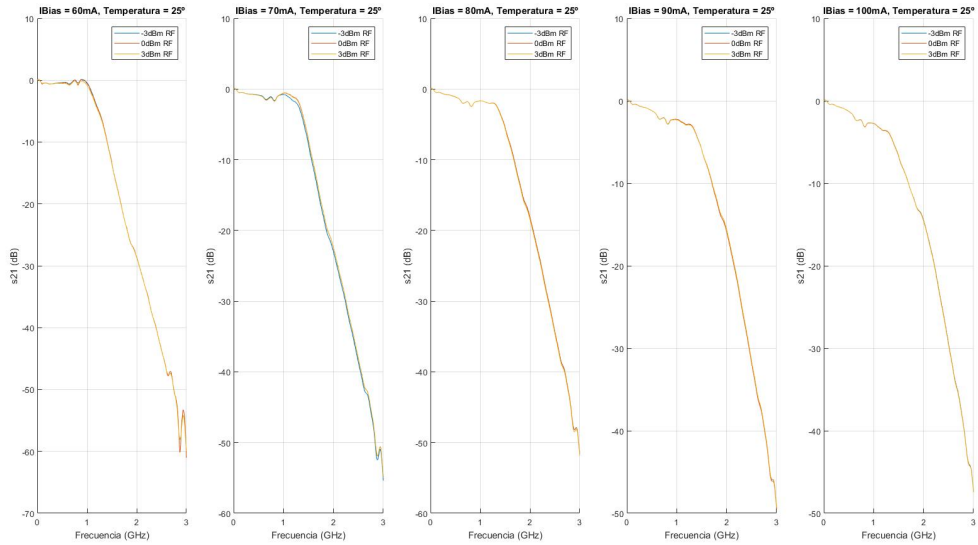


Figura III.5: Respuesta en frecuencia en función de intensidad de polarización, SPD.

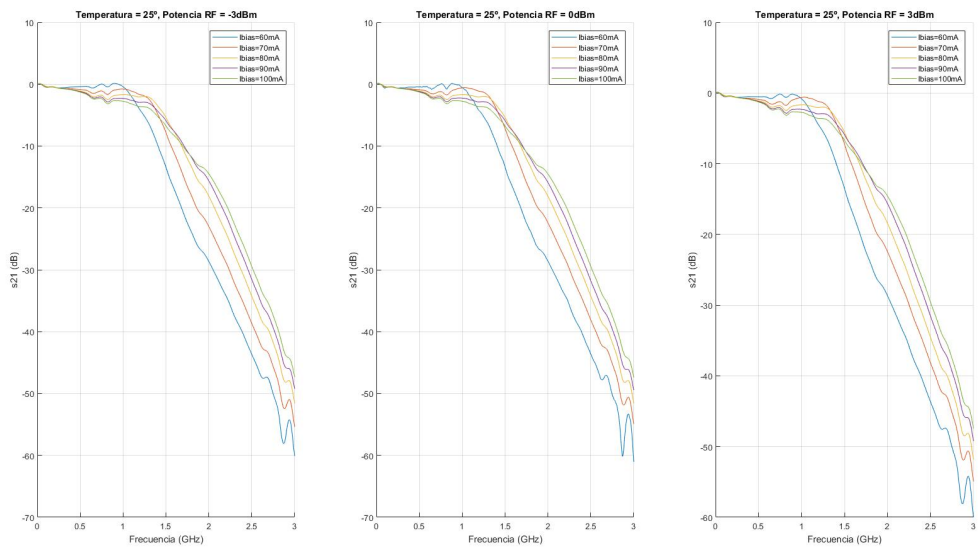


Figura III.6: Respuesta en frecuencia en función de potencia de RF, SPD.

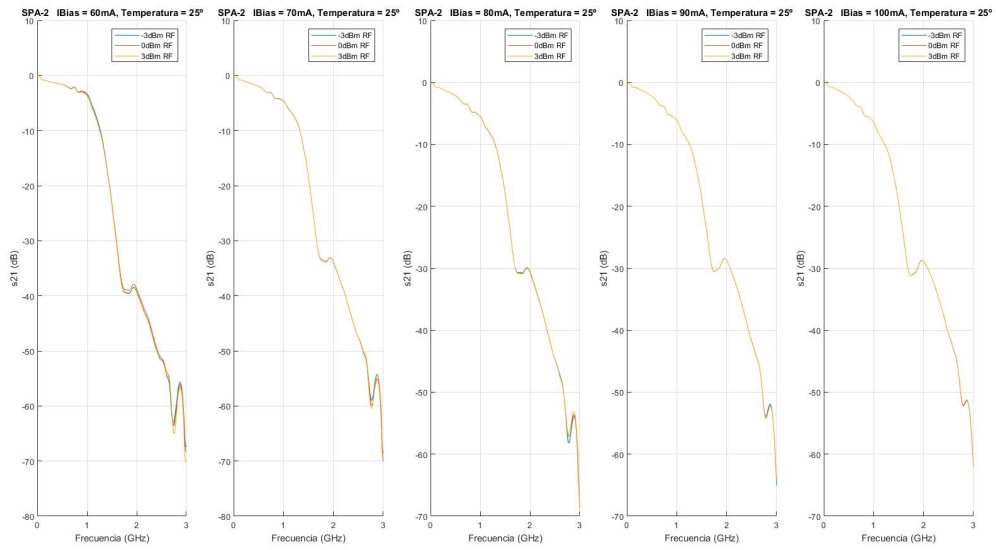


Figura III.7: Respuesta en frecuencia en función de intensidad de polarización, SPA.

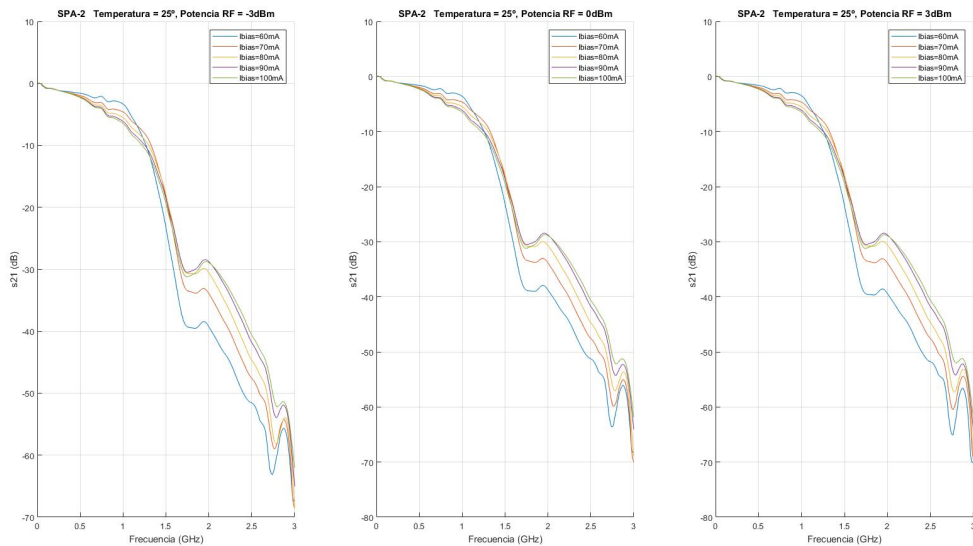


Figura III.8: Respuesta en frecuencia en función de potencia de RF, SPA.

III.3. Caracterización de acopladores

Los acopladores IFO, de Industrial Fiber Optics, son acopladores específicos para POF que se fabrican uniendo dos tramos cortos de fibras por fusión. En la zona de contacto, la potencia se transfiere en distinta proporción de una fibra a otra de forma que, según la entrada, se distribuye de distinta forma en cada una de las salidas. La fibra utilizada para fabricar los acopladores que hemos adquirido y que tenemos disponibles

en el laboratorio ha sido la GH4001. Aunque en dichas hojas de características aparece una proporción nominal de acoplo entre salidas (90/10, 80/20, 50/50) este valor es sólo indicativo y es necesario caracterizar cada uno de ellos ya que sus valores varían bastante de uno a otro. Por ello, se realizó la caracterización completa del acoplador el IF-562 (50/50). Para ello, en primer lugar, se tomaron las pérdidas de inserción, calculadas como la diferencia entre la potencia inyectada y la potencia en cada uno de los puertos de salida (Tabla III.1). En la Tabla III.2 se muestra el porcentaje de potencia presente en cada puerto.

in		1	2	3
out				
	1		16,3	3,7
	2	15,2		-0,3
	3	3,6	-0,5	

Tabla III.1: Pérdidas de inserción (dB). Acoplador IF-562.

in		1	2	3
out				
	1			28,5
	2			71,5
	3			

Tabla III.2: Porcentaje de potencia presente en cada puerto. Acoplador IF-562.

Anexo IV

Protocolos de medida

En este anexo se incluyen los protocolos de medida de forma detallada para cada fibra analizada: MH-4001, GH-4002 y BH-4001.

IV.1. Protocolo de medida MH-4001

Se parte de una fibra de 130 metros enrollada en un carrete. La punta interna del carrete se conectará a un conector ST y se fijará al LD520 durante todo el experimento de corte. Solo se usará el detector SPD-2. Con el VNA se pondrá la modulación RF a 0 dBm. La punta del otro extremo (punta externa) se conectarán a distintos dispositivos o sistemas experimentales, siguiendo este orden:

1. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (1^a medida: Pw1_G)
2. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (1^a medida: s21_1_G)
3. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (2^a medida: s21_2_G)
4. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (2^a medida: Pw2_G)
5. Registro imágenes FFP (15(-7/+7)) (carpeta: GH.L_G)
6. Corte, pelado y pulido para ST en ambas puntas externas
7. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (3^a medida: Pw3_G)
8. Medida voltaje medio en el osciloscopio con SPD-2 (1^a medida: Vx_G)
9. Obtención BER vs tasa con SPD-2 (BER_GH.L_G)
10. Registro de diagrama de ojo en tasa sin error y en tasa con 10⁻⁶ (GH.L_T_G)

11. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (4^a medida: Pw4_G)
12. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (3^a medida: s21_3_G)
13. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (4^a medida: s21_4_G)
14. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (5^a medida: Pw5_G)
15. Cortar x metros del carrete y comenzar la serie de medidas desde 1) para la siguiente longitud.

IV.2. Protocolo de medida GH-4002

Se parte de una fibra de 150 metros enrollada en un carrete. Cada una de las dos puntas de uno de sus extremos dúplex (puntas internas) se conecta a uno de los dos láseres (LD650 y LD520) mediante un conector ST. Estos extremos se mantendrán fijos durante todo el experimento de corte. Solo se usará el detector SPD-2. Con el VNA se pondrá la modulación RF a 0 dBm para ambos láseres. Con el OptoBERT se pondrá un atenuador RF de 3 dB en la entrada del láser LD650 (salida DATA). El láser LD520 se conectará con la salida DATA-negado sin atenuador. Las puntas de los otros extremos (puntas externas) se conectarán a distintos dispositivos o sistemas experimentales, siguiendo este orden:

1. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (1^a medida: Pw1_R)
2. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (1^a medida: s21_1_R)
3. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (2^a medida: s21_2_R)
4. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (2^a medida: Pw2_R)
5. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (1^a medida: Pw1_G)
6. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (1^a medida: s21_1_G)
7. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (2^a medida: s21_2_G)
8. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (2^a medida: Pw2_G)
9. Registro imágenes FFP (15(-7/+7)) (carpeta: GH_L_G)
10. Registro imágenes FFP (15(-7/+7)) (carpeta: GH_L_R)
11. Corte, pelado y pulido para ST en ambas puntas externas
12. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (3^a medida: Pw3_R)
13. Medida voltaje medio en el osciloscopio con SPD-2 (1^a medida: Vx_R)
14. Obtención BER vs tasa con SPD-2 (BER_GH_L_R)
15. Registro de diagrama de ojo en tasa sin error y en tasa con 10^{-6} (GH_L_T_R)
16. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (4^a medida: Pw4_R)

17. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (3^a medida: Pw3_G)
18. Medida voltaje medio en el osciloscopio con SPD-2 (1^a medida: Vx_G)
19. Obtención BER vs tasa con SPD-2 (BER_GH.L_G)
20. Registro de diagrama de ojo en tasa sin error y en tasa con 10⁻⁶ (GH.L.T_G)
21. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (4^a medida: Pw4_G)
22. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (3^a medida: s21.3_R)
23. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (4^a medida: s21.4_R)
24. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (5^a medida: Pw5_R)
25. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (3^a medida: s21.3_G)
26. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (4^a medida: s21.4_G)
27. Medida de la potencia óptica con el fotodetector Thorlabs (5^a medida: Pw5_G)
28. Cortar x metros del carrete y comenzar la serie de medidas desde 1) para la siguiente longitud.

IV.3. Protocolo de medida BH-4001

Se parte de una fibra de 100 metros enrollada en un carrete. Uno de sus extremos que llamaremos punta interna se conecta al láser mediante un conector ST. Este extremo se mantendrá fijo durante todo el experimento de corte. El otro extremo (punta externa) se conectará a distintos dispositivos o sistemas experimentales, siguiendo este orden:

1. Medida de la potencia óptica con el fotodetector thorlabs (1^a medida: Pw1)
2. Conexión al SPD-2. Obtención s21 (1^a medida: s21_1D).
3. Desconexión y conexión al SPD-2. Obtención s21 (2^a medida: s21_2D).
4. Medida de la potencia óptica con thorlabs (2^o medida: Pw2)
5. Conexión al SPA-2. Obtención s21 (1^a medida: s21_1A).
6. Desconexión y conexión al SPA-2. Obtención s21 (3^a medida: s21_2A).
7. Medida de la potencia óptica con thorlabs (3^a medida: Pw3)
8. Registro imágenes FFP (15 (-7/+7) (carpeta: BH_L)
9. Corte, pelado y pulido para ST
10. Medida de la potencia óptica con thorlabs (4^a medida: Pw4)
11. Medida voltaje medio en el osciloscopio con SPD o SPA según L: Vx
12. Obtención BER vs tasa. BER_BH_L con SPD-2 o SPA-2 según L
13. Registro de diagrama de ojo en una tasa sin error y en la tasa con 10-6. MH_L_T
14. Cambio a SPD o SPA según L. Medida voltaje medio en el osciloscopio: Vy
15. Tomar nota de BER para 2 tasas fijas (según longitud: 100, 500, 1000) y tasa para BER aproximado de 10^{-6} y 10^{-3}
16. Medida de la potencia óptica con thorlabs (5^a medida: Pw5)
17. Repetir 2) y 3) (3^a y 4^a medidas: s21_3D y s21_4D)
18. Repetir 5) y 6) (3^a y 4^a medida: s21_4A y s21_4A)

19. Cortar x metros del carrete y comenzar la serie de medidas desde 1) para la siguiente longitud.

Los detectores utilizados en cada longitud serán:

- 100 metros (BER con SPD y SPA)
- 85 metros (BER con SPA)
- 70 metros (BER con SPD)
- 60 metros (BER con SPA)
- 50 metros (BER con SPD y SPA)
- 40 metros (BER con SPD)
- 30 metros (BER con SPA)
- 20 metros (BER con SPD y SPA)
- 15 metros (BER con SPD)

Anexo V

Series de medidas

En este anexo se incluyen, al igual que se ha hecho en el Capítulo 3 para la fibra MH-4001, las medidas obtenidas durante los experimentos de corte para todas las longitudes de la fibra GH-4002 y BH-4001.

V.1. Serie de medidas GH-4002

Las medidas mostradas para la fibra GH-4002 son las siguientes:

- Figura V.1: respuesta en frecuencia para luz roja y luz verde.
- Figura V.2: variabilidad de los parámetros S_{21} medidos para luz roja y luz verde.
- Figura V.3: potencia óptica recibida y atenuación para luz roja y luz verde.
- Figura V.4: EAF para luz roja y luz verde.
- Figura V.5: BER vs. Tasa de transmisión para luz roja y luz verde.

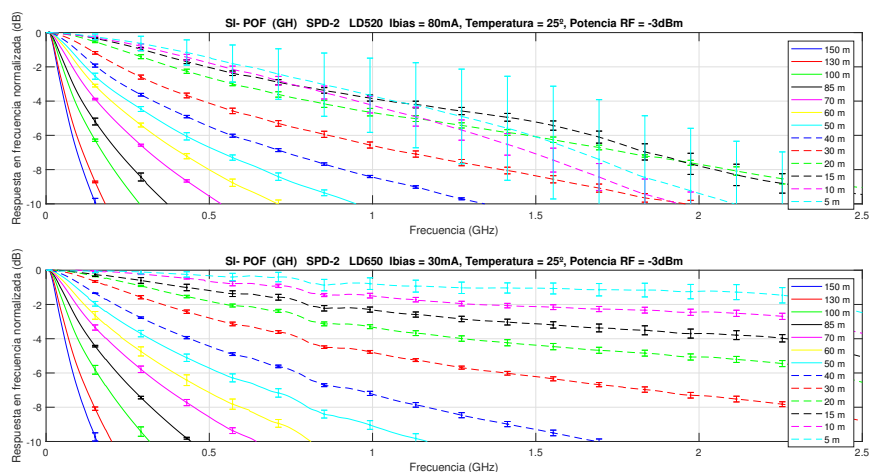


Figura V.1: Fibra GH: respuesta en frecuencia (rojo y verde).

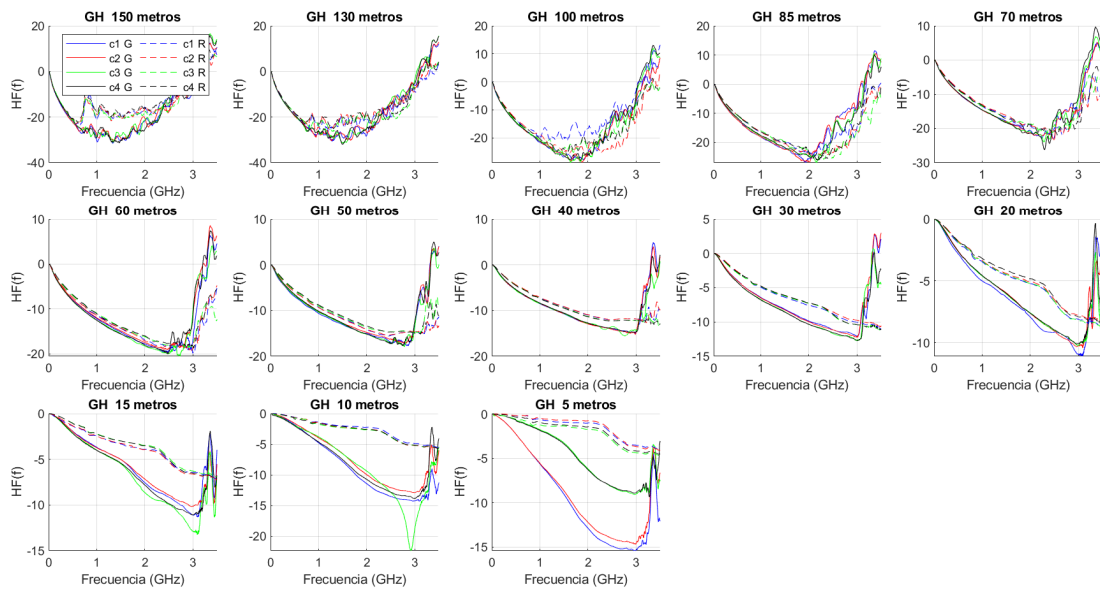


Figura V.2: Fibra GH: variabilidad de los S_{21} para cada longitud de fibra (rojo y verde).

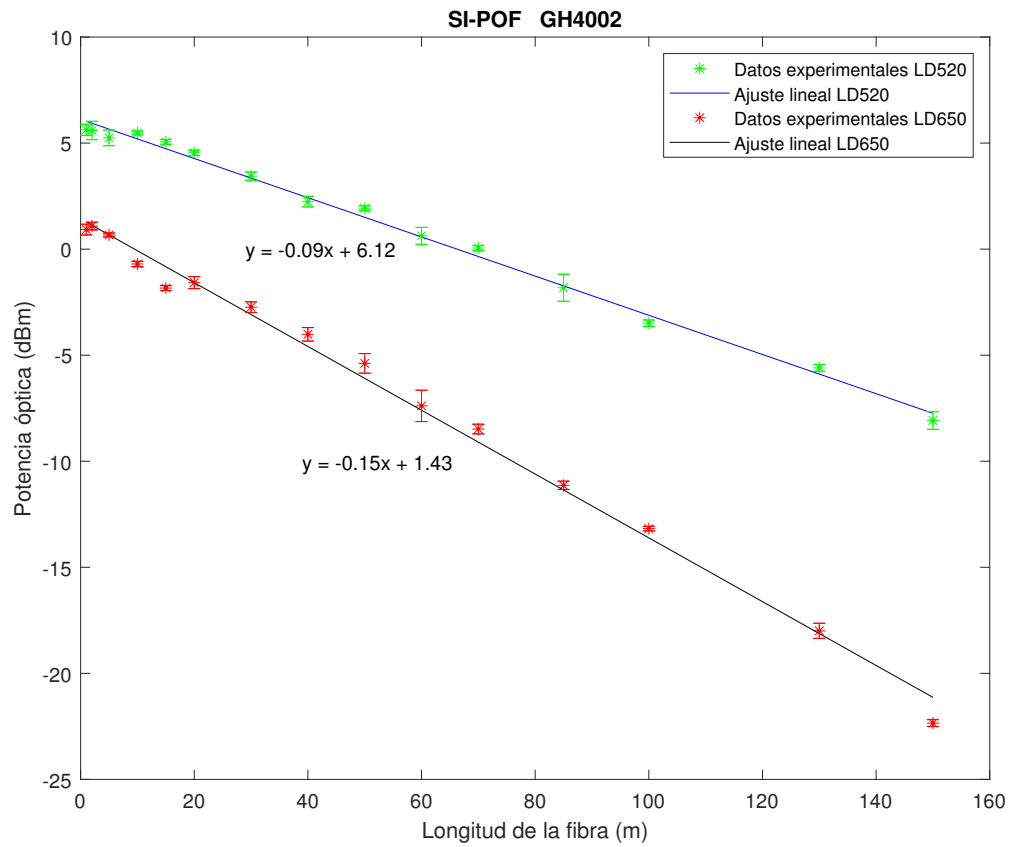


Figura V.3: Fibra GH: potencia óptica recibida (rojo y verde).

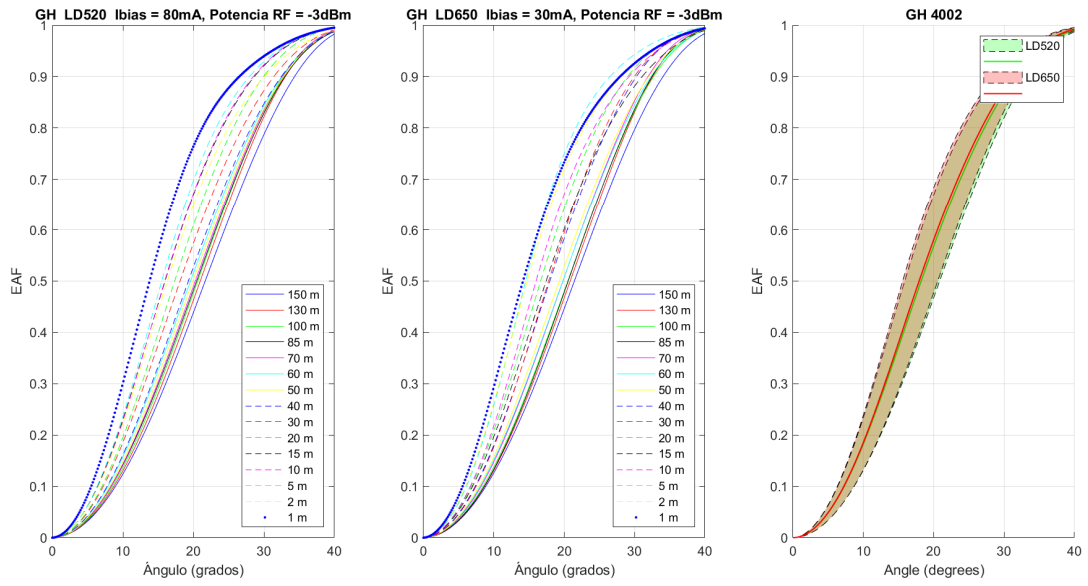


Figura V.4: Fibra GH: EAF (rojo y verde).

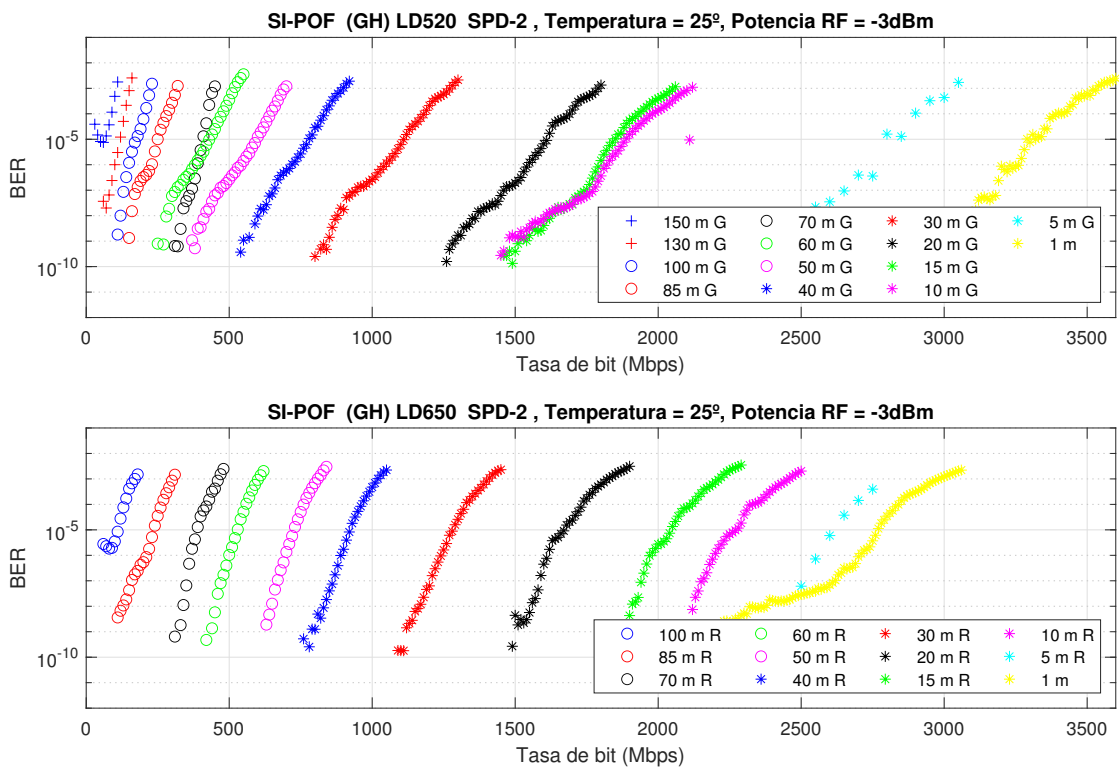


Figura V.5: Fibra GH: BER vs. Tasa de transmisión (rojo y verde).

V.2. Serie de medidas BH-4001

Las medidas mostradas para la fibra BH-4001 son las siguientes:

- Figura V.6: potencia óptica recibida y atenuación para luz verde.
- Figura V.7: respuesta en frecuencia para luz verde y SPD.
- Figura V.8: respuesta en frecuencia para luz verde y SPA.
- Figura V.9: variabilidad de los parámetros S_{21} medidos para luz verde y SPD.
- Figura V.10: variabilidad de los parámetros S_{21} medidos para luz verde y SPA.
- Figura V.11: FFPs para luz verde.
- Figura V.12: EAF para luz verde.
- Figura V.13: BER vs. Tasa de transmisión para luz verde y SPD.
- Figura V.14: BER vs. Tasa de transmisión para luz verde y SPA.

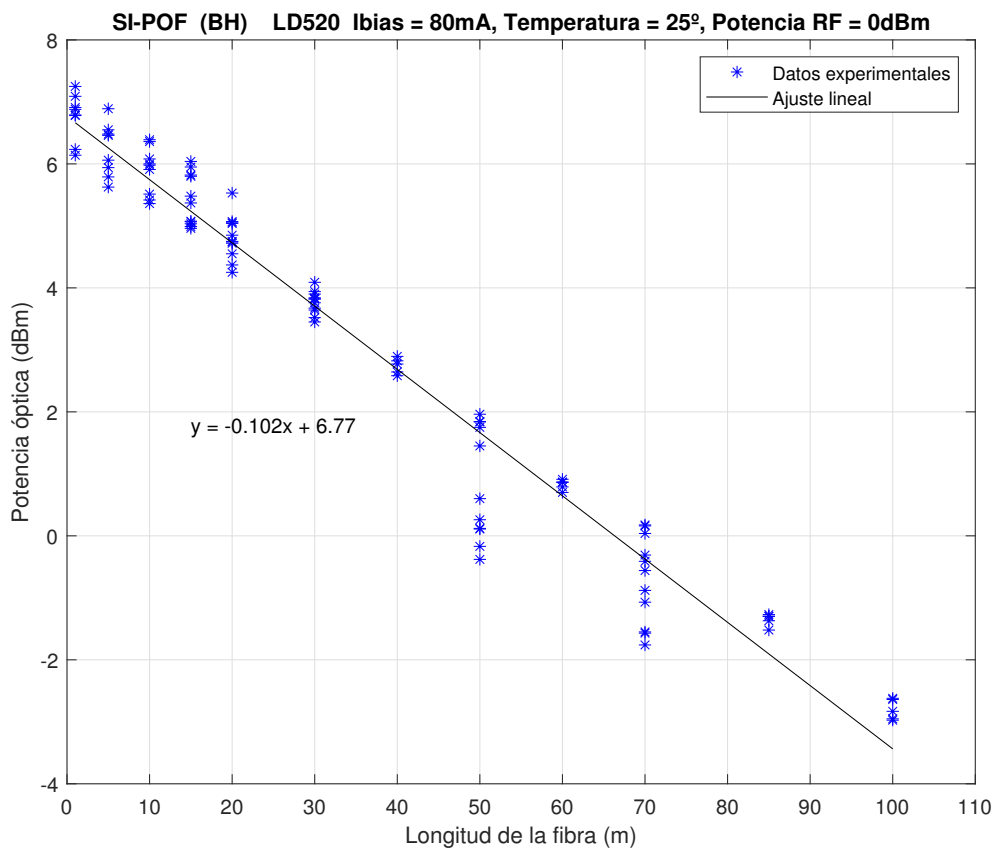


Figura V.6: Fibra BH: potencia óptica recibida para luz verde.

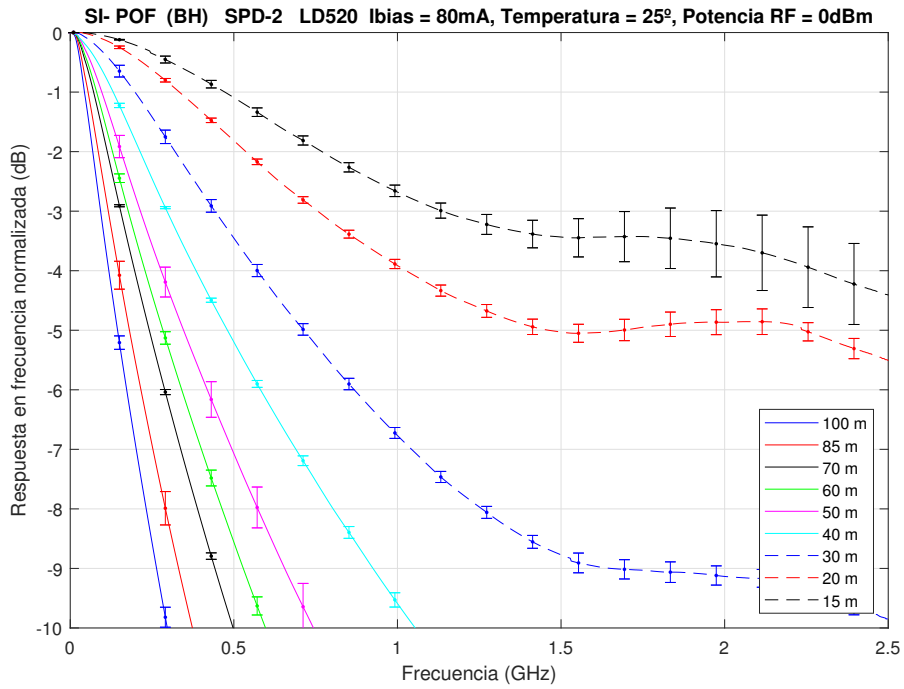


Figura V.7: Fibra BH: respuesta en frecuencia para SPD.

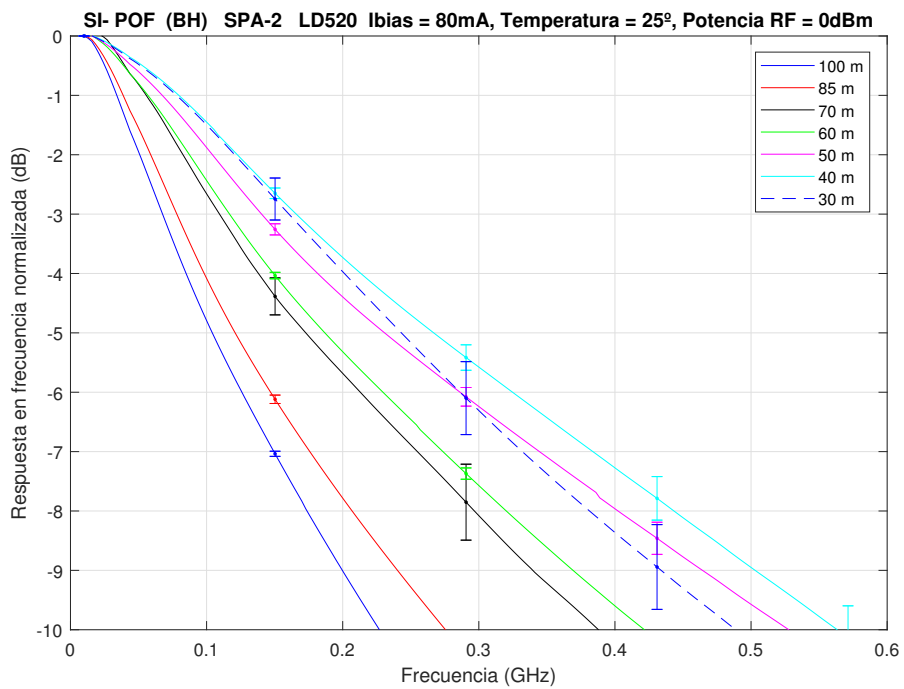


Figura V.8: Fibra BH: respuesta en frecuencia para SPA.

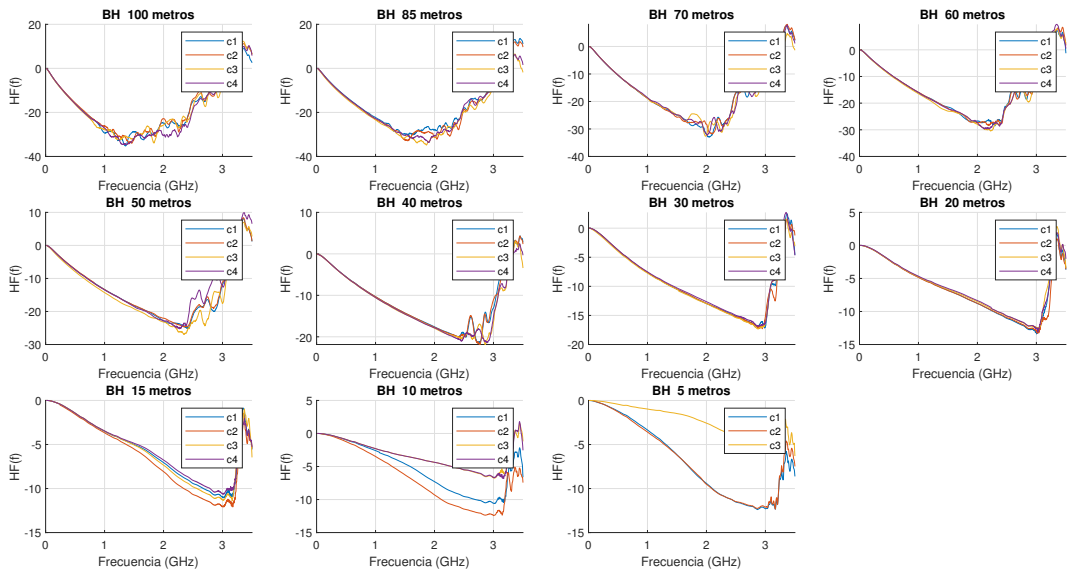


Figura V.9: Fibra BH: variabilidad de los S_{21} para cada longitud de fibra, SPD.

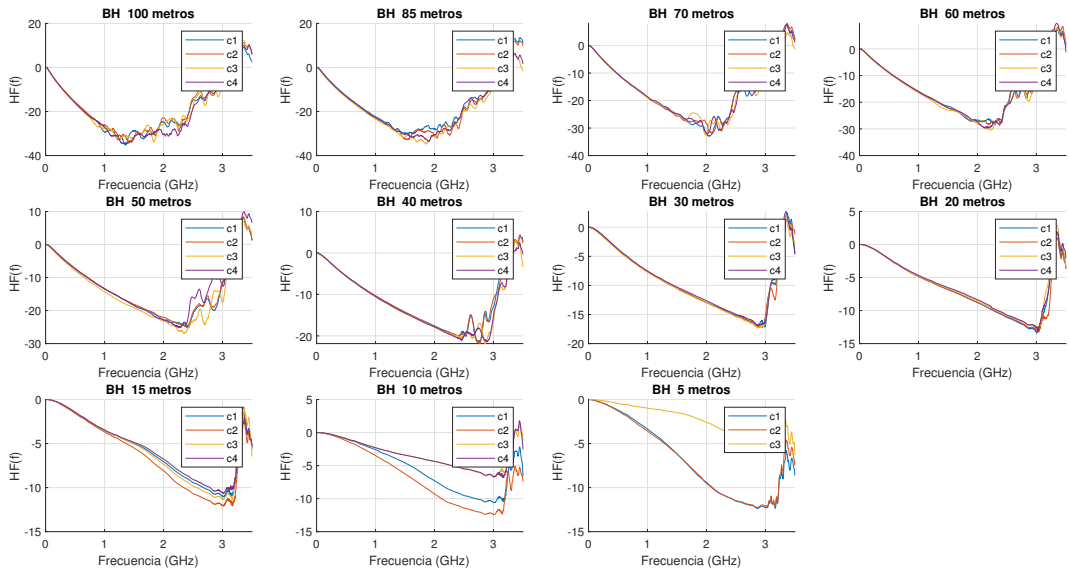


Figura V.10: Fibra BH: variabilidad de los S_{21} para cada longitud de fibra, SPA.

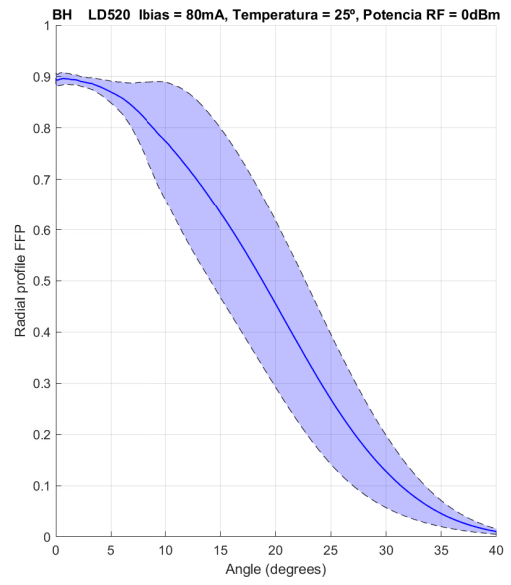
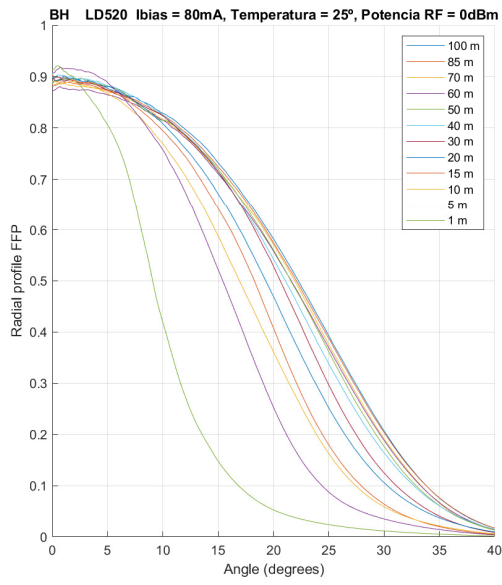


Figura V.11: Fibra BH: FFPs para luz verde.

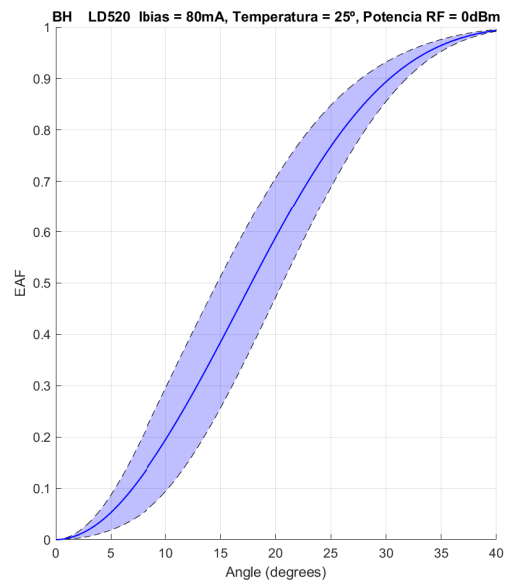
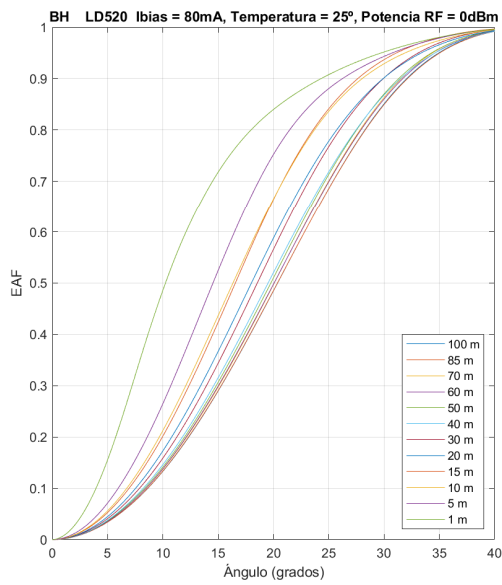


Figura V.12: Fibra BH: EAFs para luz verde.

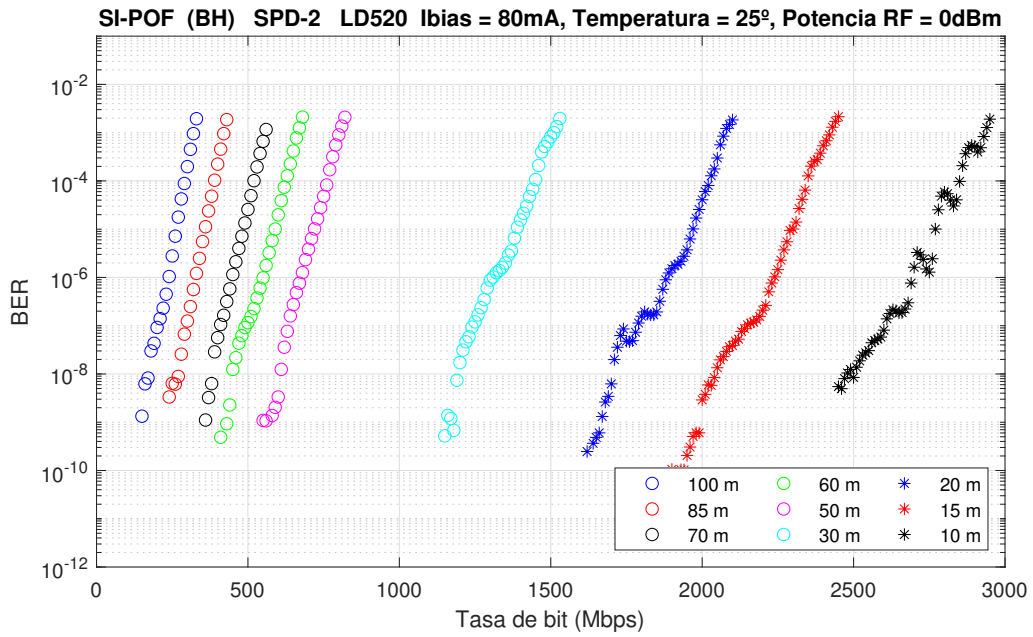


Figura V.13: Fibra BH: BER vs. Tasa de transmisión, SPD.

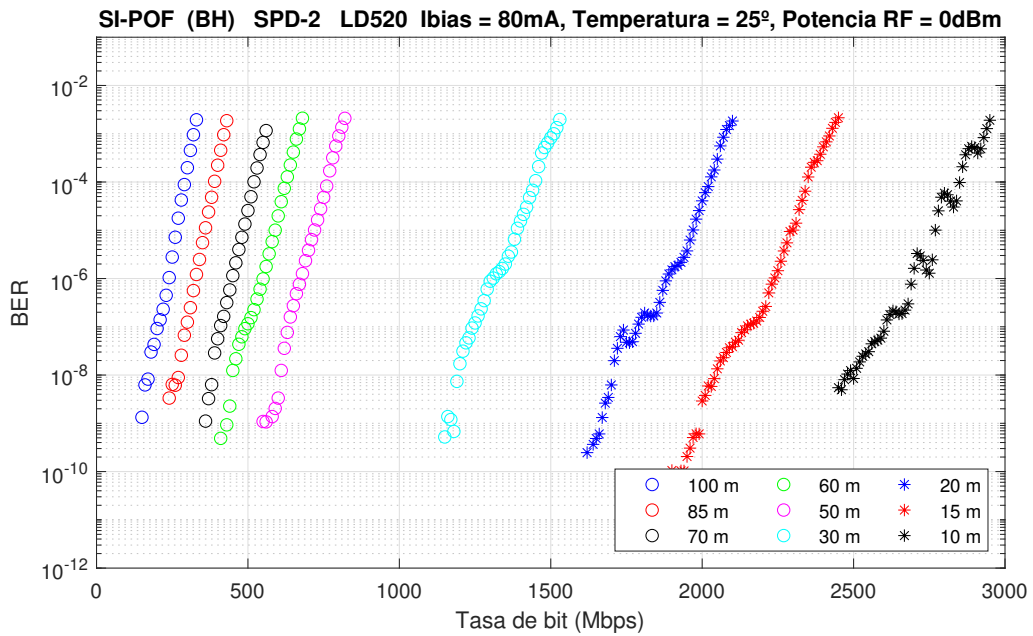


Figura V.14: Fibra BH: BER vs. Tasa de transmisión, SPA.

Anexo VI

Código desarrollado

En este anexo se incluyen los programas de MATLAB creados para el procesado y la representación óptima de los datos obtenidos en los experimentos realizados.

Los ficheros incluidos son los siguientes:

- Lectura y normalización de las medidas FFP respecto del tiempo de exposición.
- Lectura de fichero de BER vs. Tasa de transmisión.
- Ajuste SSD a la bisigmoide.
- Representación de la respuesta en frecuencia en función de la longitud de la fibra.
- Representación de la EAF en función de la longitud de la fibra.
- Representación de las curvas de BER vs. Tasa de transmisión.
- Representación de la potencia en función de la longitud de la fibra.


```

%% NORMALIZACIÓN DE FFPs AL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

clear all
close all

%%

name=['MH_1'] %Fichero a leer
a = 7; %Limite de las imagenes FFP (de -7 a 7, 15 en total)
thi=-a:1:a];
for i=1:length(thi)
    pre=num2str(abs(thi(i)));
    if abs(thi(i))<10
        pre=['0' pre];
    end
    if thi(i)<0
        tmp=dlmread([name '-' pre '.dat']);
    else
        tmp=dlmread([name '+' pre '.dat']);
    end
    aux = tmp(:,2)- min(tmp(:,2));
    M_a(i,:) = aux;
end

alpha = tmp(:,1);

fid = fopen([name '+00.cfg']);
t_dat = textscan(fid, '%s', 'delimiter', '='); % Open .cfg file % Extract data from
file
t_dat = t_dat{1,1};

exp_time_a = str2num(t_dat{end}) %Tiempo de exposicion

%% PROMEDIO FFPs
FFP_1 = mean(M_a); %Queremos una sola traza a partir de todas las
imagenes

%% EAF
[EAF_1,TPow_A] = EAF_Calculation(FFP_1,alpha); %Calculo de la EAF

%% Guardar los resultados para procesarlos con mas facilidad
save('EAF_MH.mat', 'EAF_1', '-append')
save('FFPs_MH.mat', 'FFP_1', '-append')

```

```

%% LECTOR DE FICHERO DE VER

function [frecuencia,BER] = lector_BER(fichero)
fid = fopen(fichero); %fichero que queremos leer
fich_ascii = fread(fid);
filas = 1;
columnas = 1;
mat_char = '0';
for i = 1:length(fich_ascii)
    if fich_ascii(i) == 13
        filas = filas + 1;
        columnas = 1;
    else
        columnas = columnas + 1;
    end
    mat_char(filas, columnas) = cast(fich_ascii(i), 'char');
end

mat = str2num(mat_char);

%se obtienen la frecuencia con su correspondiente BER
frecuencia = mat(:,1); %frecuencia
BER = mat(:,2); %tasa de error
End

```

```

%%% OBTENCIÓN DEL AJUSTE y COMPARACIÓN para tres tipos de fibra

%% Distribución de intensidad:
%% 1. Fuente: LD520P050 (VERDE)
%% 2. Fuente: LD650P07 (ROJO)

%% Ajustes a SSD para

%% Fuente: LD520P050 (VERDE)
load FFP_MH_130_LD520.mat %Carga de las FFPs a partir de las que se
obtienen los datos
load FFPs_GH.mat
load FFPs_BH.mat

MH130G = FFP_130;
GH150G = FFP_150_G;
GH150R = FFP_150_R;
BH100G = FFP_100;

%% Cambiar la unidades del ángulo de grados a radianes
x=alpha*pi/180;
n1=1.492;
xx=asin(sin(x)/n1); %radianes

%% Ajuste con 6 parámetros sin normalizar

SSCMH130G = FitSSC(alpha,MH130G)
BMH130G = bisigm2(SSCMH130G,xx);

SSCGH150G = FitSSC(alpha,GH150G)
BGH150G = bisigm2(SSCGH150G,xx);

SSCGH150R = FitSSC(alpha,GH150R)
BGH150R = bisigm2(SSCGH150R,xx);

SSCBH100G = FitSSC(alpha,BH100G)
BBH100G = bisigm2(SSCBH100G,xx);

%% Maximo a 1 y minimo a 0 MH

SSCMH130G(1)=1;
SSCMH130G(6)=0;

SSCGH150G(1)=1;
SSCGH150G(6)=0;

SSCGH150R(1)=1;
SSCGH150R(6)=0;

SSCBH100G(1)=1;
SSCBH100G(6)=0;

```

```

BBH100Gn = bisigm2(SSCBH100G,xx);
BMH130Gn = bisigm2(SSCMH130G,xx);
BGH150Gn = bisigm2(SSCGH150G,xx);
BGH150Rn = bisigm2(SSCGH150R,xx);

%% REPRESENTACIÓN
figure(1)
subplot(1,2,1)
plot(alpha,BMH130G, 'b')
hold on
plot(alpha,BGH150G, 'c')
plot(alpha,BBH100G, 'k')

axis([0 45 0 1])

xlabel('Ángulo (grados)')
ylabel('Distribución de intensidad')
legend('MH 130 m','GH 150 m','BH 100 m')
title('LD520 (MH vs. GH vs. BH)')
hold off

%%
figure(1)
subplot(1,2,2)
plot(alpha,BGH150G, 'g')
hold on
plot(alpha,BGH150R, 'r')

axis([0 45 0 1])

xlabel('Ángulo (grados)')
ylabel('Distribución de intensidad')
legend('LD520','LD650')
title('GH 150 m (LD520 vs. LD650)')
hold off

```



```

%% LD520 25°C 80mA 0dBm RF SPD-2

%% MH experimento de corte
close all
clear all

%% Referencia
load('.\1m\s21_1.mat')
load('.\1m\s21_2.mat')

HF_a = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_b = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);

HF = [HF_a;HF_b];

HF_ref = mean(HF);

%% Representacion HF
%% 130m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\130m\s21_1.mat')
load('.\130m\s21_2.mat')
load('.\130m\s21_3.mat')
load('.\130m\s21_4.mat')
load('.\130m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_130 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_130 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_130 = Bw(f, HF_130, -3);

%% 110m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\110m\s21_1.mat')

```

```

load('..\110m\s21_2.mat')
load('..\110m\s21_3.mat')
load('..\110m\s21_4.mat')
load('..\110m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_110 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_110 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_110 = Bw(f, HF_110, -3);

%% 100m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('..\100m\s21_1.mat')
load('..\100m\s21_2.mat')
load('..\100m\s21_3.mat')
load('..\100m\s21_4.mat')
load('..\100m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_100 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_100 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_100 = Bw(f, HF_100, -3);

%% 85m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

```

```

load('.\85m\s21_1.mat')
load('.\85m\s21_2.mat')
load('.\85m\s21_3.mat')
load('.\85m\s21_4.mat')
load('.\85m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_85 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_85 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_85 = Bw(f, HF_85, -3);

%% 70m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\70m\s21_1.mat')
load('.\70m\s21_2.mat')
load('.\70m\s21_3.mat')
load('.\70m\s21_4.mat')
load('.\70m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_70 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_70 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_70 = Bw(f, HF_70, -3);

%% 60m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1

```

```

clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\60m\s21_1.mat')
load('.\60m\s21_2.mat')
load('.\60m\s21_3.mat')
load('.\60m\s21_4.mat')
load('.\60m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_60 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_60 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_60 = Bw(f, HF_60, -3);

%% 50m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\50m\s21_1.mat')
load('.\50m\s21_2.mat')
load('.\50m\s21_3.mat')
load('.\50m\s21_4.mat')
load('.\50m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_50 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_50 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_50 = Bw(f, HF_50, -3);

%% 40m
clear y_s21_s21_1_4500_1

```

```

clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\40m\s21_1.mat')
load('.\40m\s21_2.mat')
load('.\40m\s21_3.mat')
load('.\40m\s21_4.mat')
load('.\40m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_40 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_40 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_40 = Bw(f,HF_40,-3);

%% 30m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\30m\s21_1.mat')
load('.\30m\s21_2.mat')
load('.\30m\s21_3.mat')
load('.\30m\s21_4.mat')
load('.\30m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_30 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_30 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_30 = Bw(f,HF_30,-3);

```

```

%% 20m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\20m\s21_1.mat')
load('.\20m\s21_2.mat')
load('.\20m\s21_3.mat')
load('.\20m\s21_4.mat')
load('.\20m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_20 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_20 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_20 = Bw(f, HF_20, -3);

%% 15m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\15m\s21_1.mat')
load('.\15m\s21_2.mat')
load('.\15m\s21_3.mat')
load('.\15m\s21_4.mat')
load('.\15m\s21_5.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
%HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);
HF_3 = y_s21_s21_3_4500_1-y_s21_s21_3_4500_1(1);
HF_4 = y_s21_s21_4_4500_1-y_s21_s21_4_4500_1(1);
HF_5 = y_s21_s21_5_4500_1-y_s21_s21_5_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_3;HF_4;HF_5];

HF_15 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_15 = std(0.5*(HF-HF_ref));

```

```

BW_3dB_15 = Bw(f,HF_15,-3);

%% 10m
clear y_s21_s21_1_4500_1
clear y_s21_s21_2_4500_1
clear y_s21_s21_3_4500_1
clear y_s21_s21_4_4500_1
clear y_s21_s21_5_4500_1

load('.\10m\s21_1.mat')
load('.\10m\s21_2.mat')

f = x_s21_s21_1_4500_1*10^-9;

HF_1 = y_s21_s21_1_4500_1-y_s21_s21_1_4500_1(1);
HF_2 = y_s21_s21_2_4500_1-y_s21_s21_2_4500_1(1);

HF = [HF_1;HF_2];

HF_10 = mean(0.5*(HF-HF_ref));
desv_10 = std(0.5*(HF-HF_ref));

BW_3dB_10 = Bw(f,HF_10,-3);

%% REPRESENTACION respuestas en frecuencia
figure(51)
%subplot(3,1,2)

a = plot(f(1:700), HF_130(1:700), 'b')
hold on
errorbar(f(1:50:end),HF_130(1:50:end),desv_130(1:50:end),'b.')
b = plot(f(1:700), HF_110(1:700), 'r')
errorbar(f(1:50:700),HF_110(1:50:700),desv_110(1:50:700),'r.')
c = plot(f(1:700), HF_100(1:700), 'g')
errorbar(f(1:50:end),HF_100(1:50:end),desv_100(1:50:end),'g.')
d = plot(f, HF_85, 'k')
errorbar(f(1:50:end),HF_85(1:50:end),desv_85(1:50:end),'k.')
e = plot(f, HF_70, 'm')
errorbar(f(1:50:end),HF_70(1:50:end),desv_70(1:50:end),'m.')
g = plot(f, HF_60, 'c')
errorbar(f(1:50:end),HF_60(1:50:end),desv_60(1:50:end),'c.')
h = plot(f, HF_50, 'b--')
errorbar(f(1:50:end),HF_50(1:50:end),desv_50(1:50:end),'b.')
i = plot(f, HF_40, 'r--')
errorbar(f(1:50:end),HF_40(1:50:end),desv_40(1:50:end),'r.')
j = plot(f, HF_30, 'g--')
errorbar(f(1:50:end),HF_30(1:50:end),desv_30(1:50:end),'g.')
k = plot(f, HF_20, 'k--')
errorbar(f(1:50:end),HF_20(1:50:end),desv_20(1:50:end),'k.')
l = plot(f, HF_15, 'm--')
errorbar(f(1:50:end),HF_15(1:50:end),desv_15(1:50:end),'m.')
m = plot(f, HF_10, 'c--')
errorbar(f(1:50:end),HF_10(1:50:end),desv_10(1:50:end),'c.')

%grid on

```

```

ylim([-10 0])
xlim([0 2.5])
subset = [a,b,c,d,e,g,h,i,j,k,l,m];
legend(subset, '130 m', '110 m', '100 m', '85 m', '70 m', '60 m', '50 m', '40
m', '30 m', '20 m', '15 m', '10 m', 'Location', 'southeast')
%title('SI- POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
xlabel("Frecuencia (GHz)")
ylabel("Resp. frecuencia normalizada (dB)")

```

```

%% REPRESENTACION ancho de banda en función de longitud de fibra

```

```

BW_MH =
[BW_3dB_130;BW_3dB_110;BW_3dB_100;BW_3dB_85;BW_3dB_70;BW_3dB_60;BW_3dB_50
;BW_3dB_40;BW_3dB_30;BW_3dB_20;BW_3dB_15];
long_MH = [130,110,100,85,70,60,50,40,30,20,15];

```

```

figure(2)
plot(long_MH, (BW_MH), 'b-*)
%grid on
xlim([0 140])
legend('SI-POF (MH)')
%title('SI-POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
xlabel("Longitud de la fibra (m)")
ylabel("Ancho de banda a 3dB (GHz)")

```

```

% plot en loglog
figure(3)
loglog(long_MH, (BW_MH), 'b-*)
grid on
xlim([0 140])
legend('SI-POF (MH)')
title('SI-POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
xlabel("Longitud de la fibra(m)")
ylabel("Ancho de banda a 3dB (GHz)")

```

```

%% producto BL
for i=1:length(long_MH)
    BL (i) = BW_MH (i).*long_MH(i)
end

```

```

figure(4)
plot(long_MH,BL, 'b-*)
grid on
xlim([0 140])
legend('SI-POF (MH)')
title('SI-POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
xlabel("Longitud de la fibra(m)")
ylabel("B*L (GHz x m)")

```



```

%% LD520 25°C 80mA 0dBm RF SPD-2

%% MH experimento de corte

clear all
%close all

load FFPs_MH.mat
load EAF_MH.mat

%% REPRESENTACION perfil radial

figure(8)
subplot(1,2,1)
hold on
plot(alpha,FFP_130)
plot(alpha,FFP_110)
plot(alpha,FFP_100)
plot(alpha,FFP_85)
plot(alpha,FFP_70)
plot(alpha,FFP_60)
plot(alpha,FFP_50)
plot(alpha,FFP_40)
plot(alpha,FFP_30)
plot(alpha,FFP_20)
plot(alpha,FFP_15)
plot(alpha,FFP_10)
plot(alpha,FFP_3)

legend('130 m', '110 m','100 m','85 m','70 m', '60 m','50 m','40 m','30
m', '20 m','15 m','10 m', '3 m')
ylabel('Radial profile FFP')
xlabel('Angle (degrees)')
title('MH LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia RF = 0dBm')
axis([0 40 0 1])
grid on

%% Variabilidad FFPs

MH_FFP =
[FFP_130;FFP_110;FFP_100;FFP_85;FFP_70;FFP_60;FFP_50;FFP_40;FFP_30;FFP_20
;FFP_15;FFP_10;FFP_3];

figure(8)
subplot(1,2,2)
hold on

morcilla(alpha,MH_FFP,'b')

ylabel('Radial profile FFP')
xlabel('Angle (degrees)')
title('MH LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia RF = 0dBm')
axis([0 40 0 1])
grid on

```

```

%% REPRESENTACION EAF

figure(53)
%subplot(3,1,1)

plot(alpha,EAF_130,'b')
hold on
plot(alpha,EAF_110,'r')
plot(alpha,EAF_100,'g')
plot(alpha,EAF_85,'k')
plot(alpha,EAF_70,'m')
plot(alpha,EAF_60,'c')
plot(alpha,EAF_50,'b--')
plot(alpha,EAF_40,'r--')
plot(alpha,EAF_30,'g--')
plot(alpha,EAF_20,'k--')
plot(alpha,EAF_15,'m--')
plot(alpha,EAF_10,'c--')
plot(alpha,EAF_3,'y')

legend('130 m', '110 m', '100 m', '85 m', '70 m', '60 m', '50 m', '40 m', '30
m', '20 m', '15 m', '10 m', '3 m', 'Location', 'southeast')
ylabel('EAF')
xlabel('Ángulo (grados)')
%title('MH LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia RF =
0dBm')
axis([0 40 0 1])

%% EAF en 50 y en 90

res130 = E50(alpha,EAF_130);
res110 = E50(alpha,EAF_110);
res100 = E50(alpha,EAF_100);
res85 = E50(alpha,EAF_85);
res70 = E50(alpha,EAF_70);
res60 = E50(alpha,EAF_60);
res50 = E50(alpha,EAF_50);
res40 = E50(alpha,EAF_40);
res30 = E50(alpha,EAF_30);
res20 = E50(alpha,EAF_20);
res15 = E50(alpha,EAF_15);
res10 = E50(alpha,EAF_10);
res3 = E50(alpha,EAF_3);

e50 =
[res130;res110;res100;res85;res70;res60;res50;res40;res30;res20;res15;res
10;res3];

prom = mean (e50(1:10))

res130 = E90(alpha,EAF_130);
res110 = E90(alpha,EAF_110);
res100 = E90(alpha,EAF_100);
res85 = E90(alpha,EAF_85);

```

```

res70 = E90(alpha,EAF_70);
res60 = E90(alpha,EAF_60);
res50 = E90(alpha,EAF_50);
res40 = E90(alpha,EAF_40);
res30 = E90(alpha,EAF_30);
res20 = E90(alpha,EAF_20);
res15 = E90(alpha,EAF_15);
res10 = E90(alpha,EAF_10);
res3 = E90(alpha,EAF_3);

e90 =
[res130;res110;res100;res85;res70;res60;res50;res40;res30;res20;res15;res
10;res3];

long = [130,110,100,85,70,60,50,40,30,20,15,10,3];
prom = mean (e90(1:10))

figure(1000)

plot(long,e50,'b-*')
hold on
%plot(long,e90,'k-*')

xlabel('Longitud de la fibra (m)')
ylabel('Anchura angular (grados)')
%title('SI-POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
%legend('SI-POF (MH)')
legend('EAF 50%','EAF 99%')
xlim([0 140])
%ylim([10 50])
%grid on

```



```

%% LD520 25°C 80mA 0dBm RF SPD-2

%% MH experimento de corte

%close all
clear all

%%
load MH_BER.mat

figure(52)
%subplot(3,1,3)

semilogy(f130,BER_130,'bo')
hold on
semilogy(f110,BER_110,'ro')
semilogy(f100,BER_100,'go')
semilogy(f85,BER_85,'ko')
semilogy(f70,BER_70,'mo')
semilogy(f60,BER_60,'co')
semilogy(f50,BER_50,'b*')
semilogy(f40,BER_40,'r*')
semilogy(f30,BER_30,'g*')
semilogy(f20,BER_20,'k*')
semilogy(f15,BER_15,'m*')
semilogy(f10,BER_10,'c*')

semilogy(fbtb,BER_btb,'b+')

xlabel('Tasa de bit (Mbps)')
ylabel('BER')

%title('SI-POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
lgd = legend('130 m', '110 m', '100 m', '85 m', '70 m', '60 m', '50 m', '40
m', '30 m', '20 m', '15 m', '10 m', '1m', 'Location', 'southeast')
lgd.NumColumns=5;

axis([0 3600 10^-12 10^-1])
%grid on

%% Tasa de bit para un valor de BER de 10^-6 y 10^-3

T100_6 = BBER(f100,BER_100,10^-6);
T85_6 = BBER(f85,BER_85,10^-6);
T70_6 = BBER(f70,BER_70,10^-6);
T60_6 = BBER(f60,BER_60,10^-6);
T50_6 = BBER(f50,BER_50,10^-6);
T40_6 = BBER(f40,BER_40,10^-6);
T30_6 = BBER(f30,BER_30,10^-6);
T20_6 = BBER(f20,BER_20,10^-6);
T15_6 = BBER(f15,BER_15,10^-6);
T10_6 = BBER(f10,BER_10,10^-6);
T6 = [T100_6;T85_6;T70_6;T60_6;T50_6;T40_6;T30_6;T20_6;T15_6;T10_6];

```

```

T100_3 = BBER(f100,BER_100,10^-3);
T85_3 = BBER(f85,BER_85,10^-3);
T70_3 = BBER(f70,BER_70,10^-3);
T60_3 = BBER(f60,BER_60,10^-3);
T50_3 = BBER(f50,BER_50,10^-3);
T40_3 = BBER(f40,BER_40,10^-3);
T30_3 = BBER(f30,BER_30,10^-3);
T20_3 = BBER(f20,BER_20,10^-3);
T15_3 = BBER(f15,BER_15,10^-3);
T10_3 = BBER(f10,BER_10,10^-3);
T3 = [T100_3;T85_3;T70_3;T60_3;T50_3;T40_3;T30_3;T20_3;T15_3;T10_3];

long = [100,85,70,60,50,40,30,20,15,10];

figure(6)
hold on
plot(long,T6,'b-*')

xlabel('Longitud de la fibra (m)')
ylabel('Tasa de bit (Mbps)')
title('SI-POF (MH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia RF = 0dBm')
legend('10^-6', '10^-3')
xlim([0 110])
grid on

```

```

%% LD520 25°C 80mA 0dBm RF

%% BH experimento de corte

%close all
clear all

%% REPRESENTACION potencia en función de longitud de fibra
lo100 = 100*ones(5,1);
lo85 = 85*ones(5,1);
lo70 = 70*ones(11,1);
lo60 = 60*ones(5,1);
lo50 = 50*ones(11,1);
lo40 = 40*ones(5,1);
lo30 = 30*ones(11,1);
lo20 = 20*ones(11,1);
lo15 = 15*ones(11,1);
lo10 = 10*ones(9,1);
lo5 = 5*ones(8,1);
lo1 = ones(8,1);

long = [lo100;lo85;lo70;lo60;lo50;lo40;lo30;lo20;lo15;lo10;lo5;lo1];

%%
p100 = [-2.974;-2.64;-2.831;-2.952;-2.621];
pw_100 = mean(p100);
desv_100 = std(p100);

p85 = [-1.299;-1.37;-1.297;-1.52;-1.27];
pw_85 = mean(p85);
desv_85 = std(p85);

p70 = [0.16;0.176;0.038;-0.31;-0.411];
pw_70 = mean(p70);
desv_70 = std(p70);

p70b = [-1.55;-1.76;-0.88;-0.56;-1.07;-1.57];
pw_70b = mean(p70b);
desv_70b = std(p70b);

p60 = [0.87;0.789;0.912;0.7;0.861];
pw_60 = mean(p60);
desv_60 = std(p60);

p50 = [1.844;1.962;1.45;1.837;1.75];
pw_50 = mean(p50);
desv_50 = std(p50);

p50b = [0.12;0.26;-0.17;0.6;-0.38;0.11];
pw_50b = mean(p50b);
desv_50b = std(p50b);

p40 = [2.644;2.583;2.823;2.772;2.895];
pw_40 = mean(p40);
desv_40 = std(p40);

```

```

p30 = [3.673;3.643;3.823;3.45;3.76];
pw_30 = mean(p30);
desv_30 = std(p30);

p30b = [4.09;3.9;3.94;3.52;3.84;3.82];
pw_30b = mean(p30b);
desv_30b = std(p30b);

p20 = [4.37;4.251;4.74;4.75;4.72];
pw_20 = mean(p20);
desv_20 = std(p20);

p20b = [4.85;5.04;4.55;5.05;5.53;5.07];
pw_20b = mean(p20b);
desv_20b = std(p20b);

p15 = [4.99;5.066;5.075;5.034;4.96];
pw_15 = mean(p15);
desv_15 = std(p15);

p15b = [5.37;5.82;6.04;5.95;5.8;5.48];
pw_15b = mean(p15b);
desv_15b = std(p15b);

p10 = [5.513;5.418;5.36];
pw_10 = mean(p10);
desv_10 = std(p10);

p10b = [6.08;6.36;6.39;6;5.98;5.91];
pw_10b = mean(p10b);
desv_10b = std(p10b);

p5 = [5.79;5.626];
pw_5 = mean(p5);
desv_5 = std(p5);

p5b = [6.55;5.94;6.89;6.46;6.48;6.06];
pw_5b = mean(p5b);
desv_5b = std(p5b);

p1 = [6.14;6.234];
pw_1 = mean(p1);
desv_1 = std(p1);

p1b = [7.09;6.79;7.25;6.91;6.78;6.88];
pw_1b = mean(p1b);
desv_1b = std(p1b);

p_dBm =
[p100;p85;p70;p70b;p60;p50;p50b;p40;p30;p30b;p20;p20b;p15;p15b;p10;p10b;p
5;p5b;p1;p1b];

```



```

%%
% Recta de ajuste
% Cálculo de los parámetros de regresión lineal
p=polyfit(long,p_dBm,1);
r2=corrcoef(long,p_dBm);
m=p(1); b=p(2);
% Cálculo de los nuevos valores de Id según la recta de ajuste
aprox=polyval(p,long);

%%
figure(71)
plt1 = plot(long, (p_dBm), 'b*');
hold on
plt2 = plot(long,aprox,'k');

txt = {'y = -0.102x + 6.77'};
text(15,1.8,txt)

grid on
xlim([0 110])

subset = [plt1,plt2];
legend(subset,'Datos experimentales','Ajuste lineal')
title('SI-POF (BH) LD520 Ibias = 80mA, Temperatura = 25°, Potencia
RF = 0dBm')
xlabel("Longitud de la fibra (m)")
ylabel("Potencia óptica (dBm)")

```


Anexo VII

Hojas de características

En este anexo se muestran las siguientes hojas de características:

- Dispositivos activos.
 - LD520P50 de Thorlabs
 - LD650P007 de Thorlabs
 - SPD-2 (650 nm) de Graviton
 - SPA-2 (650 nm) de Graviton
- Fibras ópticas de plástico.
 - MH-4001 de Mitsubishi
 - GH-4001 de Mitsubishi
 - GH-4002 de Mitsubishi
 - BH-4001 de Mitsubishi
- Equipos de medida.
 - VNA E5071C de Agilent
 - OptoBERT OPB3200 de Optellent
 - Cámara QICAM FAST 1394CCD de Infiniium DCA 86100^a
 - Osciloscopio Infiniium DCA 86100^a de Agilent

- Otros dispositivos.
 - Acopladores IFO de Industrial Fiber Optics
 - Medidor de potencia PM100USB de Thorlabs
 - Sensor S150C de Thorlabs
 - Base láser LDM9T de Thorlabs
 - Controlador láser LDC200 de Thorlabs



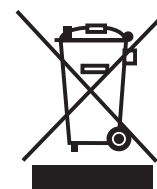
L520P50

Description

This 520 nm, 50 mW laser diode is a compact light source suited for a variety of applications including fluorescence and spectroscopic measurements, DNA sequencing, flow cytometry, imaging, and microscopy. It comes in a $\varnothing 5.6$ mm TO package with an A pin configuration. It is recommended to have the base of the laser diode in good thermal contact with a heat sink.

Specifications

Absolute Maximum Ratings*	
Specification	Maximum
Forward Current, CW	200 mA
LD Reverse Voltage	2 V
Operating Case Temperature	-20 to +60 °C
Storage Temperature	-40 to +85 °C
Soldering Temperature, <10 seconds	260 °C
Junction Temperature	150 °C

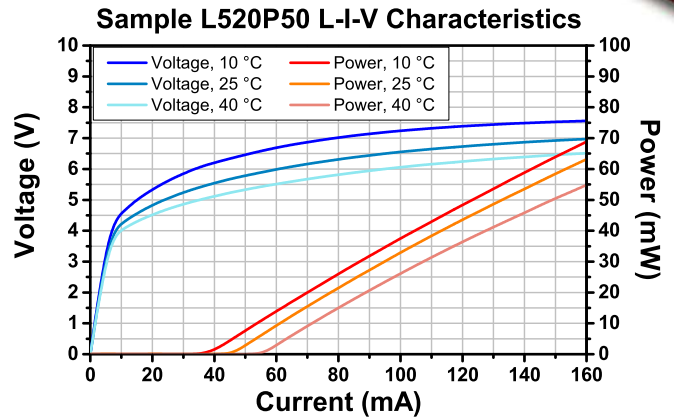
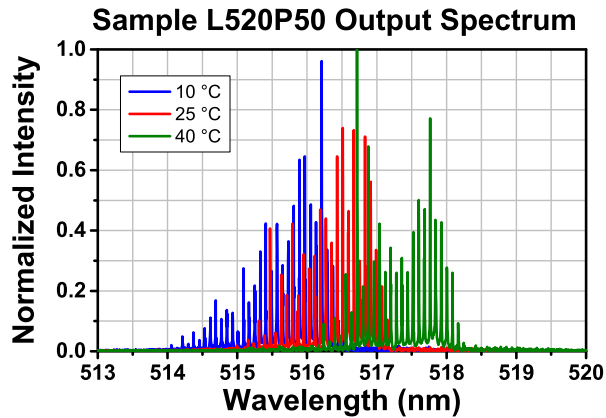


*Absolute Maximum Rating specifications should never be exceeded. Operating at or beyond these conditions can permanently damage the laser.

L520P50 Specifications					
		Symbol	Min	Typical	Max
Center Wavelength @ P _{op}		λ_o	510 nm	520 nm	530 nm
Output Power, CW		P _{op}	-	50 mW	-
Threshold Current		I _{TH}	-	45 mA	75 mA
Operating Current CW @ P _{op}		I _{op}	-	150 mA	-
Max Recommended Operating Current	-20 to +40 °C	I _{op}	-	-	160 mA
	+40 to +60 °C	I _{op}	-	-	140 mA
Operating Voltage @ P _{op}		V _{op}	-	7.0 V	8.0 V
Slope Efficiency		η	-	0.5 W/A	-
Polarization Extinction Ratio (TE/TM)		PER	-	20 dB	-
Beam Divergence (FWHM)	Parallel @ P _{op}	$\theta_{//}$	4°	7°	11°
	Perpendicular @ P _{op}	θ_{\perp}	16	22°	25°
Monitor Current @ P _{op}		I _{PD}	-	90 μ A	-
Thermal Resistance, Junction to Case		R _{th}	-	34 K/W	-
Modulation Frequency		f	-	>100 MHz	-

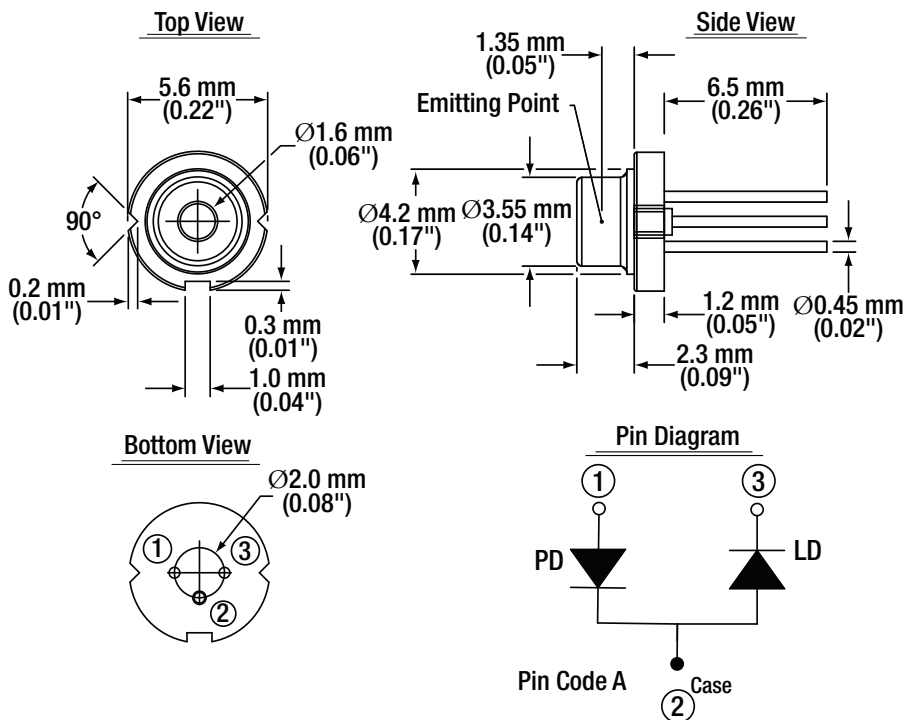
T_{CASE} = 25 °C

Performance Plots



The data presented here is for one particular laser diode. Slight variations in performance data will occur from device to device. The sample spectrum of the L520P50 laser diode was measured at 10 °C, 25 °C, and 40 °C using a Thorlabs OSA201 Spectrum Analyzer with resolution of 7.5 GHz. The L-I-V characteristics data was taken at 10 °C, 25 °C, and 40 °C. Please visit our website for raw spectral data and L-I-V characteristics at 10 °C, 25 °C, and 40 °C.

Drawings



Pin	Description
1	PD Anode
2	Case
3	LD Cathode

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

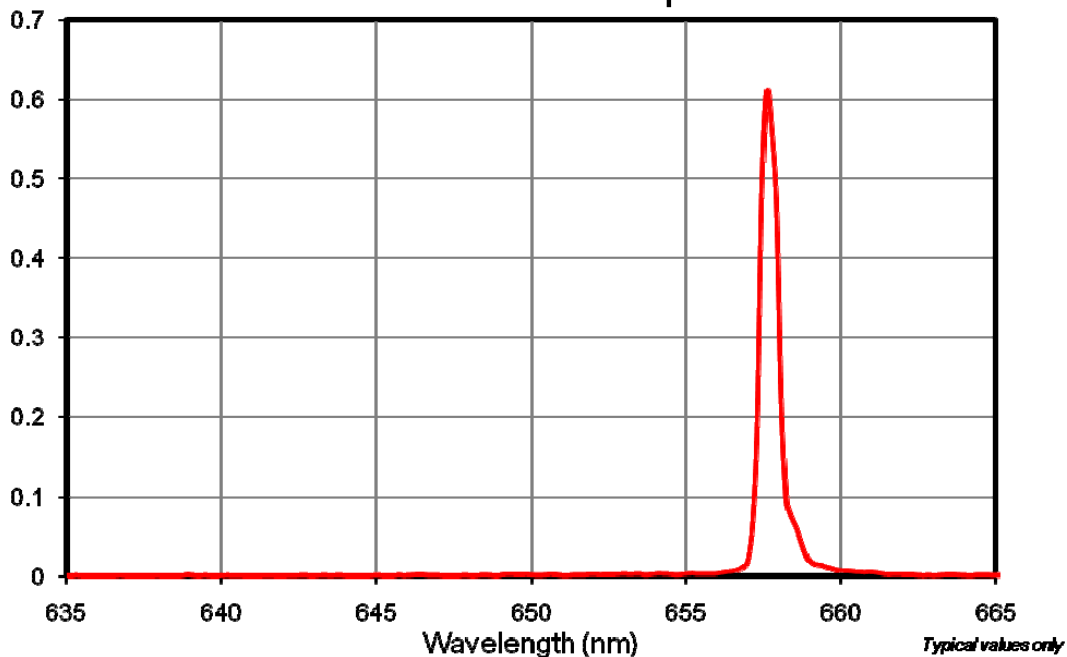
($P_o = 7 \text{ mW}$, $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

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	λ_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
	θ_{\perp}	24	28	32
Slope Efficiency, mW/mA	η	0.6	1	1.3
Monitor Current, mA	I_m	-	0.12	0.3
Astigmatism, μm	A_s	-	-	15
Beam Angle Deviation, deg	$\theta_{//}$	-3	-	3
	θ_{\perp}	-3	-	3
Emission Point Accuracy, μm	ΔX	-80		80
	ΔY	-80		80
	ΔZ	-80		80



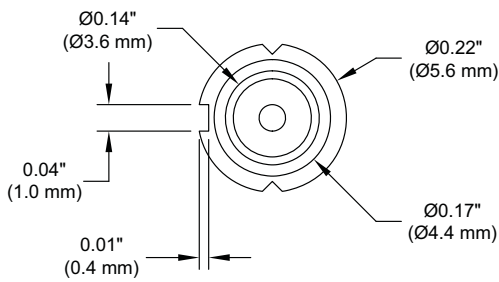
L650P007 Normalized Output Power



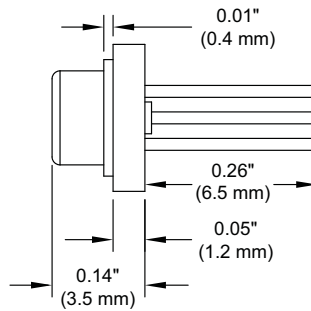
Drawings



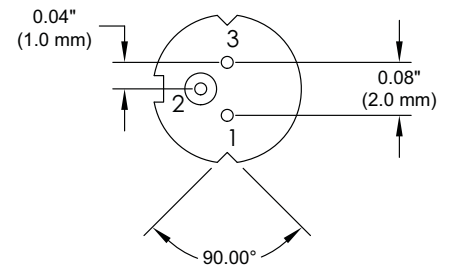
Top View



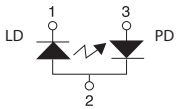
Side View



Bottom View



Pin Code 5A



Pin Description

- 1 Laser Cathode
- 2 Case Common
- 3 Monitor Diode Anode

USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.
435 Route 206
Newton, NJ 07860, USA

Tel: 973-579-7227
Fax: 973-300-3600

Europe

Thorlabs GmbH
85221 Dachau, Germany
Tel: +49-(0)8131-5956-0

Scandinavia

Thorlabs Sweden AB
431 35 Mölndal, Sweden
Tel: +46-31-733-30- 00

UK and Ireland

Thorlabs LTD.
Cambridgeshire CB7 4EX, GB
Tel: +44 (0)1353-654440

Japan and Asia

Thorlabs Japan Inc.
Nerima-ku, Tokyo 179-0081, Japan
Tel: +81-3-6915-7701

France

Thorlabs SAS
78600 Maisons-Lafitte, France
Tel: +33 (0) 970 444 844

China

Thorlabs China
Shanghai, China
Tel: +86 (0)21-60561122





O/E Converter

HOME > Product > SPA-2

** Japanese version **

Visible wavelength O/E
(Max NA = 0.2, 0.25)

- [SPD-1_650nm](#)
- [SPD-1_850nm](#)
- [SPD-2_520nm](#)
- [SPD-2_650nm](#)
- [SPD-2_850nm](#)
- [SPD-3](#)
- [SPD-4](#)

Visible wavelength O/E
(Max NA = 0.5)

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

Visible wavelength O/E
(Hi-Sensitivity)

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

NIR wavelength O/E

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

Responding characteristics of the PD in a range of convertible frequency bandwidth

Option

[Downloa\(PDF\)](#)

[O/E Selection Guide](#)

[O/E Instruction](#)

[O/E Dual-Balanced Detector](#)

[O/E Dual-PD Amp for AFM](#)

[JSTnews](#)

[E/O LD Source](#)

[E/O VCSEL Source \(670nm\)](#)

[E/O VCSEL Source \(850nm\)](#)

[8xDFB-LD Laser](#)

[HF level variable LD source](#)

[Optical Coupler](#)

[Optical Link System for Linac](#)

[Optical Link for TTL](#)

*O/E Converter : SPA-2_650nm
(Max Core = 1mm, Max NA = 0.5, 1,000V/W@658nm, DC to 1GHz)



Features:

- * For High Speed POF: ϕ 1mm (Max.core: ϕ 1.0mm and Max.NA:0.5)
- * High sensitivity: 1000V/W
- * Wide range of receivable wavelength: 320nm to 1000nm
- * Wide range of Convertible Frequency Bandwidth: DC to 1.0GHz
- * Single DC powered from +12V to +18V
- * Low output offset voltage: 0.5mV or less
- * Compact: 103mm x 44mm x 21mm
- * Lightweight: 130g
- * Equips a silicon PIN Photodiode configured with unique lens system
- * Reasonable price:JPY 290,000 for direct sales (Excluded tax and shipping cost)

- [1] Specifications
- [2] Lens system
- [3] Spectral Sensitivity (by calculation)
- [4] Step Response and Frequency Characteristics (Example)
- [5] Responding characteristics of the PD in a range of convertible frequency bandwidth
- [6] options

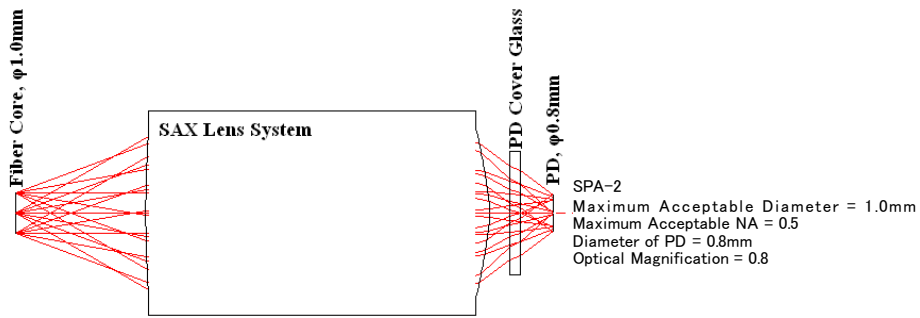
[1] Specifications

Item \ Model Name	SPA-2_650nm
Reference Wavelength	658nm
Receivable Wavelength Range	380 to 1000nm
Maximum Core Diameter	ϕ 1.0mm
Acceptable NA. Range	0.5 or less
Optical Input Connector (Standard)	FC receptacle
Photodetector Type	Si PIN PD
Active diameter of Photodetector	ϕ 0.8mm
Sensitivity (Conversion Gain at Reference Wavelength)	1,000V/W
Output Saturation Optical Input Power (Reference Wavelength)	-4dBm
Convertible Frequency Bandwidth	DC to 1.0GHz
Output Noise Level	2.0mVrms or less
Noise Equivalent Optical Power at Reference Wavelength	-27.3dBm or less

Optical Link for NIM
 Optical link for analog
 Transceiver
 (2KHz~3GHz)
 TDM Opt-communication
 System(JAMSTEC)
 Waveform Analyzer DWA-xx
 Video line inserter
 (for NTSC)
 Bessel filter

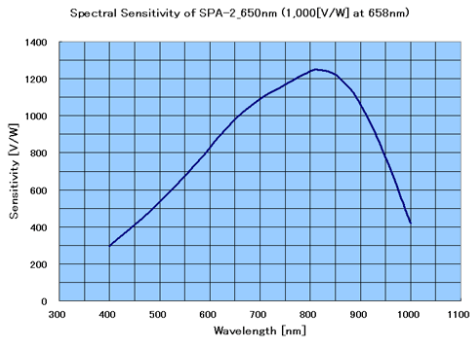
Item \ Model Name	SPA-2_650nm
Electrical Output Connector (Standard)	BNG plug
Output Impedance	50 ohms
Output Offset Voltage	0.5mV or less
DC Power Connector	LEMO 0S-4P
Supply Voltage	DC+15V
Supply Current	+150mA
Dimensions [mm]	103 x 44 x 21
Weight	Approx. 130g

[2] Lens System



[3] Spectral Sensitivity (by calculation)

SPA-2_650nm
 Reference wavelength: 658nm
 Maximum sensitivity: at 770nm



Sensitivities vs wavelength

Sensitivity	Wavelength
296 V/W	400nm
535 V/W	500nm
829 V/W	600nm
1090 V/W	700nm
1240 V/W	800nm
1063 V/W	900nm

[4] Step Response and Frequency Characteristics (Example)

SPA-2_650nm

Receivable Wavelength Range

Reference Wavelength

Model Type: SPD-2 (650nm version)

Serial Number: 153819 (ST Optical Connector, SMAJ_Electrical_Connector)

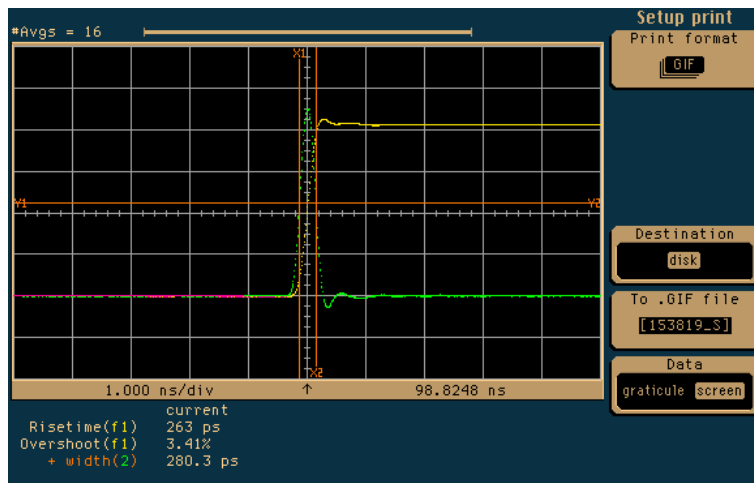


Fig.1
Impulse & Step Response

X-axis: 1ns / div
Y-axis: 50mV / div

Light Source: PLP-02
Picosecond Light Pulser 780nm (Hamamatsu Photonics)
Oscilloscope: 83480A+83485A
Digital Communications Analyzer (Agilent Technology)

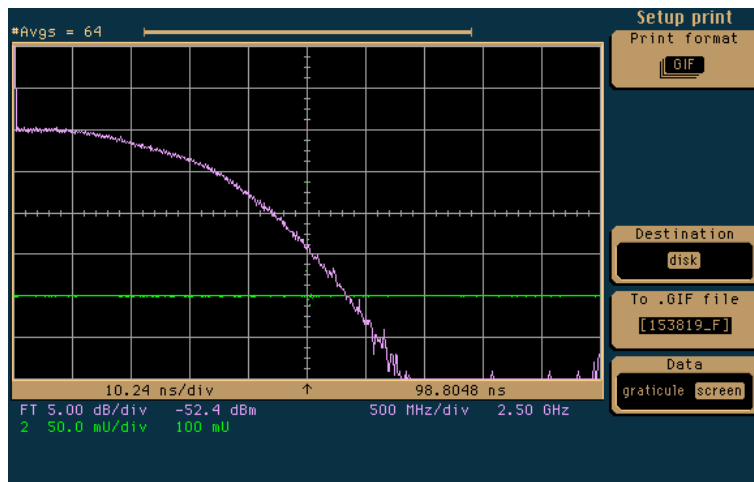


Fig.2 Frequency Response

(Calculated from the impulse response shown above)

X-axis: 500MHz / div
Y-axis: 5dBelectrical / div
Center Frequency: 2.5GHz

Noise Level & DC Performance

Item	Specifications	Measured Value	Judgment
Wideband Noise Output Voltage (Up to 12.4GHz, AC Voltage)	Less than 1.90 mVrms	1.59 mVrms	OK
Output Offset Voltage	Within +/-0.5 mV	+0.02 mV	OK
Conversion Gain at 658nm (800um GI Fiber, NA = 0.2)	900 to 1100 V/W	983 V/W	OK
Conversion Gain at 658nm (1000um SI Fiber, NA = 0.2)	900 to 1100 V/W	978 V/W	OK
Positive Supply Current	0.09 to 0.11 A	0.09 A	OK
Negative Supply Current	0.01 to 0.03 A	0.02 A	OK

Evaluated on 2019/04/22
Evaluated by Mitsuhiro Nagatomo



O/E Converter

HOME > Product > SPD-2

** Japanese version **

Visible wavelength O/E
(Max NA = 0.2, 0.25)

[SPD-1_650nm](#)

[SPD-1_850nm](#)

[SPD-2_520nm](#)

[SPD-2_650nm](#)

[SPD-2_850nm](#)

[SPD-3](#)

[SPD-4](#)

Visible wavelength O/E
(Max NA = 0.5)

[SPA-2_650nm](#)

[SPA-3](#)

[SPA-4](#)

Visible wavelength O/E
(Hi-Sensitivity)

[SPS-1](#)

[SPS-2](#)

NIR wavelength O/E

[LPD-1](#)

[LPD-2](#)

[LPS-1](#)

[LPS-2](#)

Responding characteristics of the PD in a range of convertible frequency bandwidth

Option

[Download\(PDF\)](#)

[O/E Selection Guide](#)

[O/E Instruction](#)

[O/E Dual-Balanced Detector](#)

[O/E Dual-PD Amp for AFM](#)

[JSTnews](#)

[E/O LD Source](#)

[E/O VCSEL Source \(670nm\)](#)

[E/O VCSEL Source \(850nm\)](#)

[8xDFB-LD Laser](#)

[HF level variable LD source](#)

[Optical Coupler](#)

[Optical Link System for Linac](#)

[Optical Link for TTL](#)

*O/E Converter : SPD-2_650nm and SPD-1_850nm
(Max Core = 1.0mm, Max NA = 0.25, 1000V/W@658nm or 850nm, DC to 1.2GHz)



Features:

- * For High Speed POF: ϕ 1mm (Max.core: ϕ 1.0mm and Max.NA:0.25)
- * High sensitivity: 1000V/W
- * Wide range of receivable wavelength: 320nm to 1000nm
- * Wide range of Convertible Frequency Bandwidth: DC to 1.2GHz
- * Low output offset voltage: 0.5mV or less
- * Compact: 103mm x 44mm x 21mm
- * Lightweight: 130g
- * Equips a silicon PIN Photodiode configured with unique lens system
- * Reasonable price:JPY 290,000 for direct sales (Excluded tax and shipping cost)

[1] Specifications

[2] Lens system

[3] Spectral Sensitivity (by calculation)

[4] Step Response and Frequency Characteristics (Example)

[5] Responding characteristics of the PD in a range of convertible frequency bandwidth

[6] options

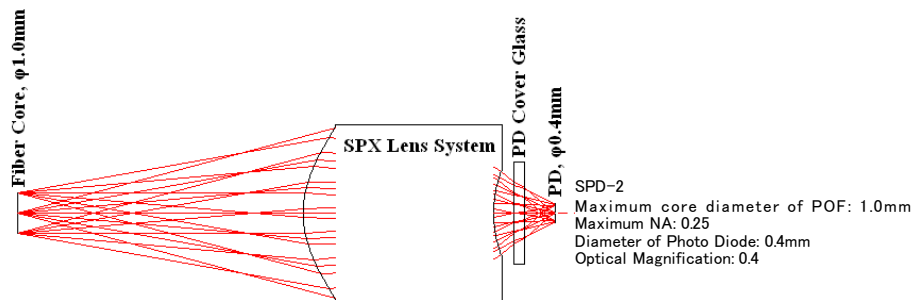
[1] Specifications

Item \ Model Name	SPD-2_650nm	SPD-2_850nm
Reference Wavelength	658nm	850nm
Receivable Wavelength Range	380 to 1000nm	380 to 1000nm
Maximum Core Diameter	ϕ 1.0mm	ϕ 1.0mm
Acceptable NA. Range	0.25 or less	0.25 or less
Optical Input Connector (Standard)	FC receptacle	FC receptacle
Photodetector Type	Si PIN PD	Si PIN PD
Active diameter of Photodetector	ϕ 0.4mm	ϕ 0.4mm
Sensitivity (Conversion Gain at Reference Wavelength)	1,000V/W	1,000V/W
Output Saturation Optical Input Power (Reference Wavelength)	-4dBm	-4dBm
Convertible Frequency 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

Optical Link for NIM
 Optical link for analog Transceiver (2KHz~3GHz)
 TDM Opt-communication System(JAMSTEC)
 Waveform Analyzer DWA-xx
 Video line inserter (for NTSC)
 Bessel filter

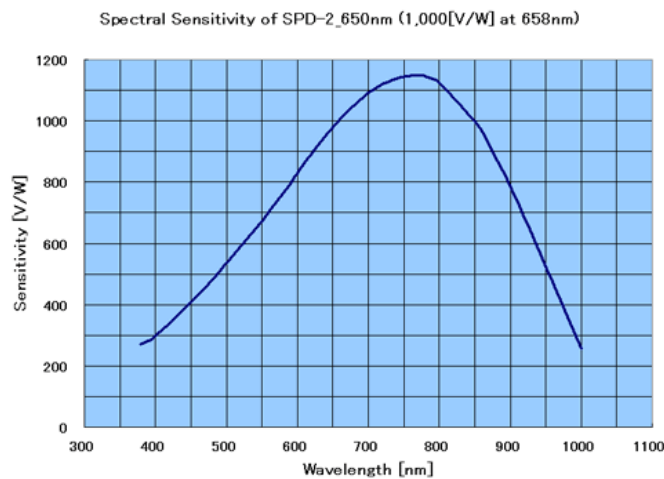
Item \ Model Name	SPD-2_650nm	SPD-2_850nm
Electrical Output Connector (Standard)	BNC plug	BNC plug
Output Impedance	50 ohms	50 ohms
Output Offset Voltage	0.5mV or less	0.5mV or less
DC Power Connector	LEMO 0S-4P	LEMO 0S-4P
Supply Voltage	DC±15V	DC±15V
Supply Current	+150mA/-50mA	+150mA/-50mA
Dimensions [mm]	103 x 44 x 21	103 x 44 x 21
Weight	Approx. 130g	Approx. 130g

[2] Lens System



[3] Spectral Sensitivity (by calculation)

SPD-2_650nm
 Reference wavelength: 658nm
 Maximum sensitivity: at 770nm



Sensitivities vs wavelength

Sensitivity	Wavelength
296 V/W	400nm
535 V/W	500nm
829 V/W	600nm
1090 V/W	700nm
1125 V/W	800nm
790 V/W	900nm

SPD-2_850nm
 Reference wavelength: 850nm
 Maximum sensitivity: at 770nm

Sensitivities vs wavelength

Sensitivity	Wavelength
298 V/W	400nm
539 V/W	500nm
834 V/W	600nm
1098 V/W	700nm
1133 V/W	800nm
795 V/W	900nm

Model Type: SPA-2 (650nm version)

Serial Number: 189021 (ST Optical Connector, SMAJ Output Connector)

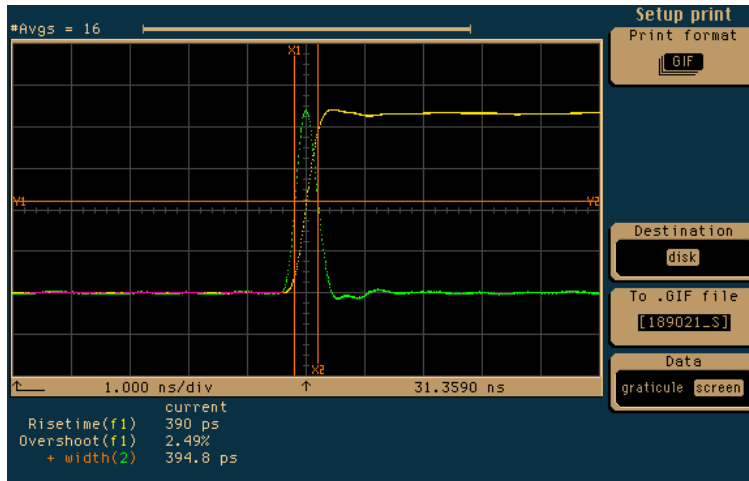


Fig.1 Impulse & Step Response

X-axis: 1ns / div
Y-axis: 50mV / div

Light Source: PLP-02
Picosecond Light Pulser 780nm (Hamamatsu Photonics)
Oscilloscope: 83480A+83485A Digital Communications Analyzer (Agilent Technology)

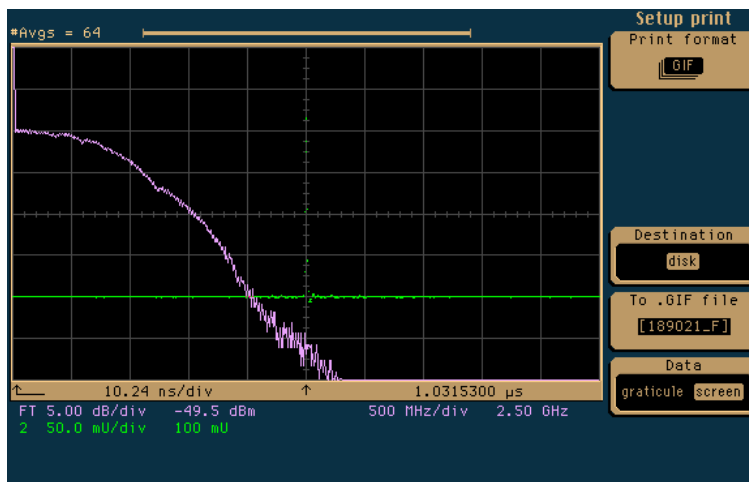


Fig.2 Frequency Response

(Calculated from the impulse response shown above)

X-axis: 500MHz / div
Y-axis: 5dBelectrical / div
Center Frequency: 2.5GHz

Noise Level & DC Performance

Item	Specifications	Measured Value	Judgment
Wideband Noise Output Voltage (Up to 12.4GHz, AC Voltage)	Less than 2.00 mVrms	1.93 mVrms	OK
Output Offset Voltage	Within +/-0.5 mV	+0.01 mV	OK
Conversion Gain at 658nm (100um SI Fiber, NA = 0.2)	900 to 1,100 V/W	1,023 V/W	OK
Conversion Gain at 658nm (1,000um HPCF, NA = 0.48)	900 to 1,100 V/W	1,006 V/W	OK
Positive Supply Current	0.11 to 0.13 A	0.12 A	OK
Negative Supply Current	Must be Zero	0.00 A	OK

Evaluated on 2021/02/05
Evaluated by Manabu Fujita

Specification Sheet

MH 4001

ESKAMEGA

Polyethylene Jacketed

Optical Fiber Cord

High - Performance Plastic Optical Fiber

E s k aTM

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.Scope

This specification covers basic requirements for the structure, optical and mechanical performances of MH4001.

2.Structure

Table1

MH 4001

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	—	0.3		
	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	—	ESKAMEGA ; Pink		
Approximate Weight		g / m	4		

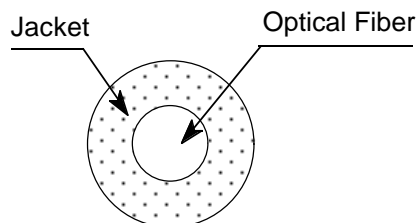
Sectional View

Table2

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	- 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	ϕ50 nm Collimated Light]	dB/km	—	—	160
	Transmission Loss under 95 %RH	ϕ50 nm Collimated Light]	dB/km	—	—	180
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment =< 0.5 dB [A Quarter Bend]	mm	25	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment =< 1 dB [in Conformity to the JIS C 6861]	Times	5,000	—	—
	Tensile Strength	[Tensile Force at 5Åì Elongation; in Conformity to the JIS C 6861]	N	70	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment =< 1 dB [Sample Length : 1 m Tensile Force : 4.9 N]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment =< 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.

Specification Sheet

GH 4001

ESKA PREMIER

Polyethylene Jacketed

Optical Fiber Cord

High - Performance Plastic Optical Fiber

E s k aTM

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.Scope

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

2.Structure

Table1

GH 4001

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

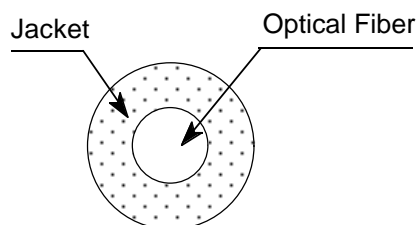


Table2

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	ϕ50 nm Collimated Light]	dB/km	—	—	170
	Transmission Loss under 95 %RH	ϕ50 nm Collimated Light]	dB/km	—	—	190
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment =< 0.5 dB [A Quarter Bend]	mm	25	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment =< 1 dB [in Conformity to the JIS C 6861]	Times	10,000	—	—
	Tensile Strength	[Tensile Force at 5Åì Elongation; in Conformity to the JIS C 6861]	N	70	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment =< 1 dB [Sample Length : 1 m Tensile Force : 4.9 N]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment =< 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.

Specification Sheet

GH 4002

ESKA PREMIER

Polyethylene Jacketed

Optical Fiber Cord

High - Performance Plastic Optical Fiber

E s k a[™]

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.Scope

This specification covers basic requirements for the structure, optical and mechanical performances of GH4002.

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	μ m	920	980	1,040	
	Cladding Diameter	μ m	940	1,000	1,060	
Number of Fibers		—	2			
Jacket	Material and Color	—	Polyethylene			
	Dimension	Minor Axis	mm	2.13	2.20	2.27
		Major Axis	mm	4.3	4.4	4.5
Indication on the Jacket		—	ESKA PREMIER :Pink color			
Approximate Weight		g / m	8			

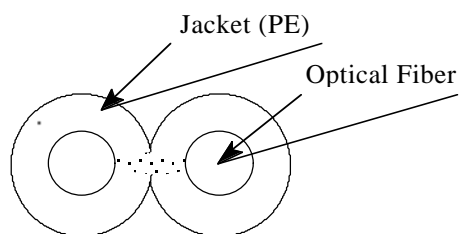
Sectional View

Table2

GH 4002

Item		Acceptance Criterion and / or [Test Condition]	Specification			
			Unit	Min.	Typ.	Max.
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties*	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature under 95 %RH	No Deterioration in Optical Properties**	°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 =< 0.5 dB [Quarter bend]	mm	25	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment =< 1dB [90° 25 mmR Dead Weight : 500 g]	Times	10,000	—	—
	Tensile Strength	[Tensile Force at 5% Elongation; in Conformity to the JIS C 6861]	N	140	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment =< 1 dB [Sample Length : 1 m Tensile Force : 4.9 N]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment =< 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 .

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.

ESKA™ Polyethylene Jacketed Optical Fiber Cord: BH4001

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

January 2010

Structure		
Core Material	Polymethyl Methacrylate Resin (PMMA)	
Cladding Material	Fluorinated Polymer	
Core Refractive Index	1.49	
Refractive Index Profile	Step Index	
Numerical Aperture	0.58	
	Unit	Typical
Core Diameter	μm	980
Cladding Diameter	μm	1,000
Jacket Diameter	mm	2.18
Approximate Weight	g/m	3.8

Packaging	
Spool Length (m)	500
Net weight on spool (kg)	3.1
Spool Weight (kg)	1.2
Carton Size (mm)	370 X 370 X 170
Carton Weight (kg)	3.8
Master Carton	5 spools
Jacket	
Color and Material	Black, Cross-linked PE
Indication on Jacket	None

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

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

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

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

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

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

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



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

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



Agilent E5071C ENA Network Analyzer

9 kHz to 4.5/6.5/8.5 GHz

**100 kHz to 4.5/6.5/8.5 GHz
(with bias tees)**

**300 kHz to 14/20 GHz
(with bias tees)**

*The industry standard in
RF network analysis*



Agilent Technologies

ENA – New Standards in Speed, Accuracy and Versatility

Agilent's E5071C ENA network analyzers deliver new standards in speed, accuracy and versatility for RF network analysis. Designed with a wide range of measurement capability to meet multiple network analysis needs, the ENA offers efficiency and flexibility for both manufacturing and R&D applications in industries such as wireless communication, automotive, semiconductor, and medical.

Key features

- ▶ Wide frequency coverage: 9 kHz to 20 GHz
 - ▶ Low trace noise: < 0.004 dB rms at 70 kHz IFBW
 - ▶ Wide dynamic range: > 123 dB
 - ▶ Fast measurement speed: 9 msec for 401 points with error correction
 - ▶ High temperature stability: 0.005 dB/°C
-
- 2 or 4 ports, plus flexible multiport configuration of up to 22 ports with E5092A
 - Built-in VBA programming environment enables high throughput and UI customization
 - Powerful analysis and error correction
 - Advanced characterization of mixers (such as the vector mixer calibration) and amplifiers with frequency offset mode (optional)
 - Advanced characterization of high-speed serial interconnects with enhanced time domain analysis (optional)
 - Upgrade are available for all E5071C options at any time



OptoBERT™ OPB3200

3.2Gbps Optical & Electrical Bit-Error-Rate Tester (BERT)



Overview

The OPTELLENT OptoBERT™ OPB3200 is a cost-effective easy-to-use bit-error-ratio (BER) measurement system for testing components and systems in R&D and manufacturing environments as well as field installations. It incorporates a pattern generator, clock recovery circuits, and a bit-error-ratio analyzer in one compact module that provides both electrical and optical interfaces at data rates up to 3.2Gb/s. The OptoBERT integrated system eliminates the need for additional interface modules to test devices.

The OPB3200 is offered with either preset discrete datarates or with a continuously variable datarate (1kHz step size).

An intuitive graphical user interface (GUI) enables easy point-and-click operation. The GUI displays error counts, BER, and features a unique error-events display for measuring events such as signal interruption due to optical switching.

BER test data from the OptoBERT are output directly into a spreadsheet file without any programming or scripting.

Applications

- ▶ Production testing of optical transceivers, diplexers/triplexers, and subsystems
- ▶ Production testing of Opto-electronic components and devices TOSA, ROSA, lasers, etc...)
- ▶ Production testing of Gb/s ICs, electronic modules, subsystems, and systems
- ▶ Product development and qualification testing
- ▶ Installation testing and troubleshooting in optical transport networks

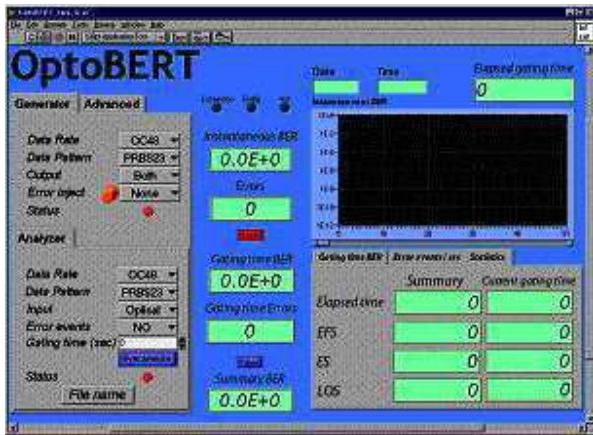
Key Features

- ▶ Integrated Generator and Analyzer
- ▶ Electrical and optical interfaces
- ▶ Internal Clock & Data Recovery
- ▶ Variable Datarate (1 kHz Step size)
- ▶ Automated Measurement Report
- ▶ Unique Error Events Display
- ▶ Cost-efficient and Easy-to-use

Test Applications

Telecom	
OC-3	155.52 Mb/s
OC-12	622.08 Mb/s
OC-48	2.48832 Gb/s
OC-48 with FEC	2.66606 Gb/s
Storage	
Fibre Channel	1.0625 Gb/s
Serial-ATA	1.5 Gb/s
2G Fibre Channel	2.125 Gb/s
Serial-ATA2	3 Gb/s
Networking & Computing	
Gigabit Ethernet	1.25 Gb/s
Serial-ATA	1.5 Gb/s
Serial-ATA2	3 Gb/s
RapidIO	1.25 – 3.125G
XAUI	3.125 Gb/s

Software

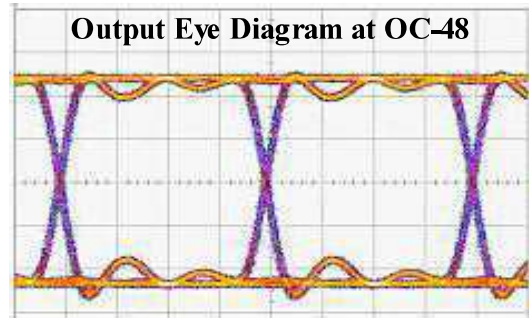


User Interface

The OptoBERT™ OPB3200 software runs on Windows 98/2000/NT and XP over RS-232 serial interface via an RJ-45 Connector provided on the front panel.

A Serial-to-USB converter can be used if a serial port is not available.

Software drivers are available for incorporating the OptoBERT into test automation suites using programs like C++, LabVIEW, VisualBASIC, and HP VEE.



Pattern Generator

Parameter	Min	Typ	Max	Units
Output Type	Single-ended or Differential (Optional)			
Data Patterns	<ul style="list-style-type: none"> • Standard: PRBS 2^7-1, $2^{23}-1$, 101010 • Optional: CID, K28.5, CJPAT, CRPAT, FDDI, Custom 			
Data Rates	<ul style="list-style-type: none"> • Preset (Standard): OC-3, 12, 48; OC48+ FEC; GbE; FC; 2xFC; XAUI • Custom Preset: (Optional) • Continuously Variable Data Rate (1kHz Step size) (Optional) 			
Data Rate Range	155.52		3125	Mb/s
Frequency Accuracy			± 50	ppm
Output Amplitude, Single Ended ^{(1), (2)}	700	850	1200	mV
Data Rise Time ⁽³⁾		70	90	ps
Data Fall Time ⁽³⁾		70	90	ps
Data Output RMS Jitter ⁽³⁾		4	5.5	ps
Clock Output Amplitude		300		mV
Error Injection	10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} , single error			
Optical Output	Standard SFP Transceiver Housing			
Connector, Electrical	50 Ω SMA, front panel			
Connector, Optical	LC (SFP)			
Trigger Output				
Output Amplitude	400			mV
Output Type	Single-ended, AC-coupled			
Connector	50 Ω SMA, front panel			

(1) Larger output signal amplitudes up to 1800mV are available as an option

(2) Continuously variable output signal amplitude is available as an option

(3) Measurements based on PRBS $2^{23}-1$ data at OC-48

Optical Output & Input:

SFP housing is provided as a standard feature. This enables the use of any user-selectable Multi-source Agreement (MSA) compliant SFP transceiver module:

- Single mode (SMF) and multimode fiber (62.5/125um and 50/125um MMF)
- At any wavelength option (850nm, 1310nm, 1490nm, 1550nm, etc...)
- DWDM, CWDM, non-WDM
- P-i-n and APD detectors

Error Analyzer

Parameter	Min	Typ.	Max	Units
Input Type	Single-ended AC coupled			
Data Patterns	<ul style="list-style-type: none"> • Standard: PRBS 2⁷-1, 2²³-1, 101010 (standard) • Optional: CID, K28.5, FDDI 			
Data Rates	<ul style="list-style-type: none"> • Preset (Standard): OC-3, 12, 48; OC48+ FEC; GbE; FC; 2xFC; XAUI • Custom Preset: (Optional) • Continuously Variable Data Rate (1kHz Step size) (Optional) 			
Data Rate Range	155.52		3125	Mb/s
Electrical Sensitivity ⁽¹⁾			50	mV
Electrical Data Input	50		1000	mV
Clocking Mode	Built-in clock recovery			
Pattern Synchronization	Automatic			
Connector, Electrical	50 Ω SMA, front panel			
Connector, Optical	SFP LC (SFP)			

(1): Measurements based on PRBS 2²³-1 data at 2488.32 Mb/s (OC-48).

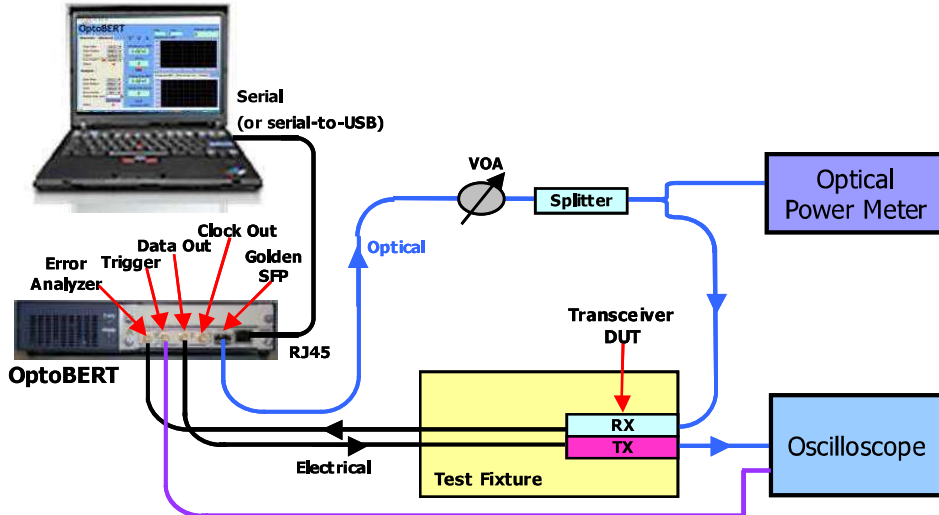
System & General Specifications

PARAMETER	MIN	MAX	UNIT
Chassis Electrical Voltage	100	240	VAC
Current Drain at Normal Voltage		1.4	A
Operating Temperature Range	5	45	°C
Storage Temperature Range	-40	70	°C
Dimensions (L x W x H)	273x216x45 10.75x8.5x1.75		mm ³ inch ³
Optical Interface	Standard SFP housing Minimum number of insertion/deinsertion cycles: 200		
Safety	UL, IEC-61010-1		
EMC	EN55011, EN61000-3-2, EN61000-3-3, BS EN61326		
RS 232 PC Interface	RJ-45 connector		
RF Connectors	SMA		
Standard Warranty	2 years		

Manufacturing Test of Transceiver Modules

Example: Rx: Sensitivity measurement

Tx: Output mask test with oscilloscope



Ordering Information

OPB3200-X-X-X-X

- X: other Custom Options
- 0: No Optical Transceiver;
1: Optical Transceiver (SFP) 850nm
2: Optical Transceiver (SFP) 1310nm
3: Optical Transceiver (SFP) 1550nm
4: Optical Transceiver (SFP) 1490nm
5: Optical Transceiver (SFP) DWDM with High-sensitivity APD Receiver
- S: Single-ended Electrical Output
D: Differential Output
- P: Preset Standard Data Rates
C: Custom Data Rates
V: Continuously Variable Data Rate (1kHz Step Size)

Accessories Included

- User Software
- User Manual
- Power cord
- PC Interface cable

Example: OPB3200-P-S-0: 3.2Gb/s OptoBERT, Preset data rates, Single-ended electrical output, No optical transceiver

Related Products and Accessories

Model Number	Description
OPB4250	4.25Gb/s OptoBERT
OPB1250	1.25Gb/s OptoBERT
OPG4250	4.25 Gb/s Data Pattern Generator
OPG3200	3.2 Gb/s Data Pattern Generator
OPG1250	1.25 Gb/s Data Pattern Generator
OPS Series	Multichannel Optical Switch for Single Mode and Multimode Fiber
OPR3200	3.2Gb/s Retimed Optical Receiver
OPZ1015	Serial-to-USB Converter
OPZ3004	Additional 1 year Warranty

Specifications are subject to change without notice.
OptoBERT™ is a registered trademark of Optellent, Inc.

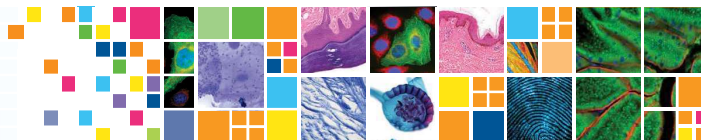
© 2007 OPTELLENT Inc.

Rev 3.5

Optellent Inc. Phone: (408) 230-1329 Fax: (408) 228-8976 Email: sales@optellent.com <http://www.optellent.com/>



DIGITAL IMAGING MADE EASY



PRODUCT DATASHEET

QICAM *FAST1394*

High-Performance IEEE 1394 FireWire™ Digital CCD Camera

Monochrome or Color

The QImaging QICAM digital camera is designed for high-resolution, brightfield scientific and industrial applications. A progressive-scan interline CCD sensor gives a resolution of 1.4 million pixels in a 12-bit digital output. High-speed, lownoise electronics provide linear digital data at frame rates up to 110 fps with binning and ROI. The IEEE 1394 FireWire™ digital interface allows ease of use and installation with a single wire. No framegrabber or external power supply is required. The QICAM includes QCapture software (Windows® and Mac OS) for real-time image preview and capture. A Software Development Kit (SDK) is available upon request for interfacing with custom software.

applications

- Brightfield and Phase-Contrast Microscopy
- Live-Cell Imaging
- Pathology, Histology, & Cytology
- Motility & Motion Analysis
- DNA Analysis
- Metallurgical Microscopy
- Semiconductor Inspection
- Failure Analysis
- Forensic Analysis

High-Performance Digital CCD Camera



features	benefits
High-Resolution, 1.4-Million-Pixel Sensor	<ul style="list-style-type: none"> ■ Highly detailed, sharp images
High-Speed Readout	<ul style="list-style-type: none"> ■ Previewing & focusing in real time ■ 165fps maximum frame rate ■ 110fps with 4x4 binning & RO ■ 10fps full resolution ■ Ideal for automated imaging applications
Flexible Exposure Control from 12µs to 17.9min	<ul style="list-style-type: none"> ■ Optimal integration over a wide range of light levels
12-Bit Digitization/ 36-Bit Color Digitization	<ul style="list-style-type: none"> ■ 4096 grey levels for precise light-intensity discrimination ■ 4096 levels per channel for superior color images
External Sync & Trigger	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tight synchronization with flashlamps, automated filters, shutters, & microscope stage
Peltier Cooling	<ul style="list-style-type: none"> ■ Minimizes thermal noise during low-light imaging
ROI (Region of Interest)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Higher frame rates for precise analysis of rapidly changing specimens
Binning	<ul style="list-style-type: none"> ■ Increases sensitivity for quantitation & imaging of very low light levels ■ Increases frame rate
IEEE 1394 FireWire™ QImaging Fast 1394 Technology	<ul style="list-style-type: none"> ■ Simple connectivity ■ Ease of use & installation ■ Portability with laptop computer ■ Simultaneous use of multiple cameras through a single port ■ Single-cable operation (no external power supply or control unit)
Extensive Third-Party Software Support	<ul style="list-style-type: none"> ■ Choose from a large selection of life science & industrial software for microscopy, machine vision, & video-streaming applications

QICAM Specifications

ccd sensor

Light-Sensitive Pixels	1.4 million; 1392 x 1040
Binning Modes	2x2, 4x4 8x8
ROI (Region of Interest)	From 1x1 pixels up to full resolution, continuously variable in single-pixel increments
Exposure/Integration Control	12µs to 17.9min in 1µs increments
Sensor Type	Sony® ICX205 progressive-scan interline CCD (monochrome or color)
Pixel Size	4.65µm x 4.65µm
Linear Full Well	10,000e-
Read Noise	12e-
Cooling Available	Yes (optional)
Cooling Type	Peltier thermoelectric cooling to 25°C below ambient
Digital Output	12 bits
Readout Frequency	20, 10, 5, 2.5MHz
Frame Rate	10fps full resolution @ 12 bits (165fps maximum with binning and ROI)

camera

Computer Platforms/ Operating Systems	Windows® 7, Vista and XP (32/64 bit)
Digital Interface	IEEE 1394 FireWire™
Sustained Data Rate	40MB/s
Shutter Control	Electronic shutter, no moving parts
External Trigger	TTL Input
Trigger Types	Internal, Software, External
External Sync	TTL Input
Gain Control	0.6 to 15x
Offset Control	-2048 to 2047
Optical Interface	1/2", C-mount optical format
Threadmount	1/4" — 20 mount
Power Requirements	6W (non-cooled); 11W (cooled); 8-24V
Weight	635g (non-cooled); 915g (cooled)
Warranty	2 years
Operating Environment	0 to 50°C (32 to 122°F)
Storage Temperature	-10 to 60°C
Humidity	Less than 80% non-condensing at 35°C (95°F)

camera models

Includes: IEEE 1394 FireWire™ cable, IEEE 1394 PCIe card, QCapture software, and access to SDK

■ Monochrome QICAM Cooled

Model: QIC-F-M-12-C

■ Monochrome QICAM Non-Cooled

Model: QIC-F-M-12

CCD Digital Camera, 12 Bits

■ Color QICAM Cooled

Model: QIC-F-CLR-12-C

■ Color QICAM Non-Cooled

Model: QIC-F-CLR-12

CCD Digital Camera, 12 Bits

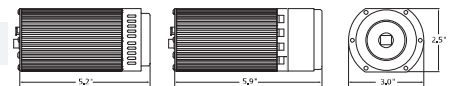
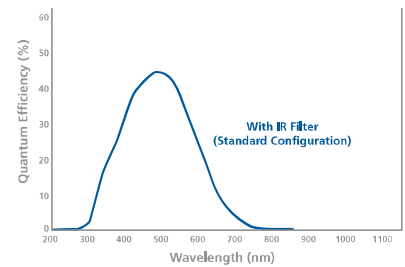
camera options

- **RGB Color Filter**
for monochrome cameras (F-mount interface required), refer to data sheet for more details



- **Extended Warranty**

spectral response



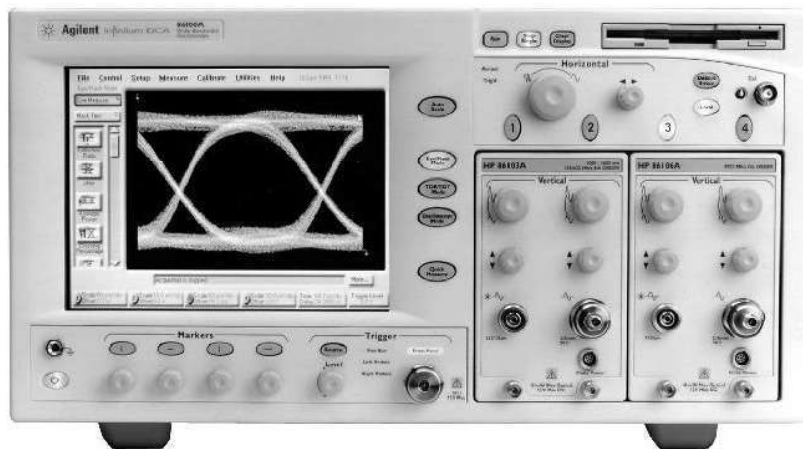
Tel 604.530.5800 ■ Fax 604.539.1825 ■ info@qimaging.com
www.qimaging.com

*Refer to Qimaging website for detailed listing of supported operating systems.
Note: Specifications are typical and subject to change.

QICAM is a trademark of Qimaging Corporation.
Qimaging is a registered trademark of Qimaging Corporation.
Other brand and product names are the trademarks or registered trademarks of their respective owners and manufacturers.

QLQICAM_DS_Rev_A7

- Bandwidth to 50 GHz
- 100 Mb/s to 12.5 Gb/s and beyond
- Built-in compliance tests
- Integrated optical and electrical channels
- Familiar Windows-98 user interface
- Compatible with 83480A series modules



86100A

86100A Infiniium DCA – Wide-Bandwidth Oscilloscope



Agilent 86100A Infiniium DCA was designed to make accurate waveform measurements fast and simple. The Infiniium DCA can be viewed as three instruments in one. It's a general purpose equivalent time sampling oscilloscope, a digital communication analyzer, and time-domain reflectometer. Just select the instrument mode and start making measurements.

Familiar Windows-98 User Interface

The Infiniium DCA has an intuitive graphical user interface, so you won't have to spend a lot of time learning or relearning the instrument. Pull-down menus give you easy access to advanced features and icons provide quick access to an extensive set of common tests and measurements. Use the high-performance touchscreen or a mouse to navigate the instrument interface.

The simple, uncluttered front panel has the feel of an analog scope with dedicated scale and position knobs for each vertical channel. Trigger LEDs show you trigger status at a glance. To speed up measurements, you can configure the Quick Measure key for instant access to any four measurements in each instrument mode.

Measurement Speed

Measurement speed has been increased with both fast hardware and a friendlier user interface. In the lab, you can't afford to waste time figuring out how to make a measurement, the Infiniium DCA eliminates the relearning curve. In manufacturing, it is a battle to continually reduce cost per test. Infiniium DCA has fast PC-based processors, resulting in high measurement throughput and reduced test time.

Smaller Modular Platform

The Infiniium DCA has a large and growing family of plug-in modules designed for a broad range of data rates for optical and electrical waveforms. The Infiniium DCA can hold up to 2 modules for a total of 4 measurement channels. To protect your investment in Agilent's previous platform, all modules from the 83480A and 54750A family are forward compatible with the Infiniium DCA.

The Infiniium DCA is smaller and much lighter than the previous generation wide-bandwidth oscilloscopes. It also uses less than half the power the 83480A and 54750A used.

GPIB Code Compatible

The remote programming command set for the Infiniium DCA has been designed to be directly compatible with software written to control the 83480A and 54750A. (Due to improvements and updates in performance, a small set of remote commands may need minor modifications to control the Infiniium DCA.)

Compliance Tests

Accurate eye-diagram analysis is essential for characterizing the quality of transmitters used from 100 Mb/s to beyond 12.5 Gb/s. The Agilent Infiniium DCA was designed specifically for the complex task of analyzing digital communications waveforms. Compliance mask and parametric testing no longer require a complicated sequence of setups and configurations. The important measurements you need are right at your fingertips, including:

- Industry standard mask testing with built-in margin analysis
- Extinction ratio measurements with improved accuracy and repeatability
- Automatic eye measurements: crossing %, eye height and width, '1' and '0' levels, jitter, rise or fall times and more.

Time Domain Reflectometer (TDR)

TDR measurements are focused on high-speed applications where it is necessary to optimize electrical system components, such as microstrip lines, PC board traces, SMA edge launchers and coaxial cables where imperfections cause signal distortion and reflections. Signal integrity is a critical requirement in high-speed digital signal transmission.

Built-in Information System

Infiniium DCA's built-in information system puts measurement assistance at your fingertips. You'll no longer have to look for the manual when you need help setting up the DCA or making complex measurements. A set-up guide gives you step-by-step instructions for many measurements and procedures. Links on the measurement screen take you directly to the information you need in the on-line manual.

Internal Hard and Floppy Disk Drives

Use the internal 3 GB hard drive or the 3.5 inch, 120 MB SuperDisk floppy disk drive to store instrument setups, waveforms, or screen images. Screen images can be stored in many standard industry file formats. LAN access is supported for network access and file sharing.

Gated Triggering

Rear panel trigger gating port allows easy external control of data acquisition for circulating loop or burst-data experiments. Use TTL-compatible signals to control when the instrument does and does not acquire data.

Stimulus Response Testing Using the 86130A BitAlyzer

Error performance analysis represents an essential part of digital transmission test. The Infiniium DCA and 86130A BitAlyzer error performance analyzer come together to create a powerful test solution where two instruments together can perform measurements that would not be possible. For more information on the 86130A BitAlyzer see page 406.

© Keysight Technologies

Internet URL www.agilent.com/find Reproduced with Permission, Courtesy of Keysight Technologies

Oscilloscopes

122 Digital Communications Analyzer (cont.)

0A
eries



86100A with plug-in modules

Modules for the 86100A Infiniium DCA

The Infiniium DCA has a large family of plug-in modules designed for a broad range of data rates for optical and electrical waveforms. The Infiniium DCA can hold up to 2 modules for a total of 4 measurement channels. All optical measurement plug-in modules also have a dual bandwidth electrical channel.

The Agilent 86101A and 86103A modules incorporate an optical channel with over 2.85 GHz of bandwidth and a 20 GHz electrical channel. The electrical channel has both a 20 GHz mode for better waveform fidelity, and a 12.4 GHz mode for optimum noise performance. The calibrated, integrated optical channel has over 2.85 GHz bandwidth for easy, precise single-mode and multimode optical measurements. The 86101A and 86103A utilize switchable reference filters for transceiver compliance testing at OC-3, OC-12, OC-48, Fibre Channel, 1063, and Gigabit Ethernet 1250 data rates. The 86101A operates over the 750 nm to 860 nm wavelength range, and the 86103A operates over the 980 nm to 1625 nm wavelength range.

The 86105A module incorporates a single-mode optical channel with over 20 GHz of bandwidth and a 20 GHz electrical channel. The electrical channel has both a 20 GHz mode for better waveform fidelity, and a 12.4 GHz mode for optimum noise performance. The 86105A utilizes switchable reference filters for transceiver compliance testing at OC-3, OC-12, OC-48, and OC-192 data rates.

The 86106A module incorporates a 10 Gb/s optical reference receiver and a 40 GHz electrical channel. The electrical channel also has a reduced bandwidth setting of 18 GHz for improved noise performance. It includes a reference receiver path for 10 Gb/s transmitter test that has been designed to meet OC-192/STM-64 standards.

The 86109A module incorporates a 30 GHz optical measurement channel and a 40 GHz electrical channel. The electrical channel has a reduced bandwidth setting of 18 GHz for improved noise performance. The optical channel frequency response is designed to minimize distortion of the displayed optical pulse and does not include any provision for switching a SDH/SONET filter into the channel.

The 86112A electrical module provides two measurement channels with user selectable bandwidths. The 12.4 GHz bandwidth mode provides better noise performance for accurate measurement of small signals. The 20 GHz bandwidth mode provides high fidelity display and measurement of very high speed waveforms.

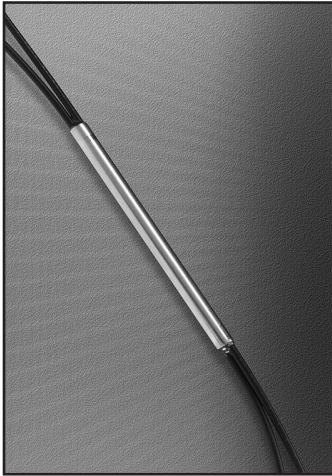
The 83484A electrical module provides two measurement channels with user selectable bandwidths. The 26.5 GHz bandwidth mode provides better noise performance for accurate measurement of small signals, and 50 GHz bandwidth mode provides higher fidelity for very high speed waveforms.

The 54753A is a two channel electrical plug-in with a TDR step generator built into channel one. The TDR channel has 18 GHz of bandwidth while the second channel has 20 GHz of bandwidth. The 54754A is a differential TDR with two channels, each of which have a built-in step generator and 18 GHz of bandwidth.

The 8349XA series of clock recovery modules provide a recovered clock and recovered data output, and the ability to trigger on data for slower rates. The 83491A accepts electrical inputs, the 83492A accepts multimode fiber inputs, and the 83493A accepts single mode fiber inputs. The new 83494A clock recovery module provides clock recovery for both 2.488 and 9.953Gb/s testing. All four clock recovery modules support standard telecom and/or enterprise data rates.

Plug-in Module	Electrical Channels		Optical Channel					
	Number	Bandwidth GHz	Fiber Input	Wavelength	Unfiltered Bandwidth GHz (typical)	Filters	Filter Rates Mb/s	Mask Test Sensitivity (Characteristic)
83484A	2	26.5/50						
86101A (83487A)	1	12/20	62.5/125 um	750–860 nm	2.85 (>3.0)	2 or 3	155, 622, 1063, 1250, 1563, 2125, 2488	(–17 dBm)
86103A (83486A)	1	12/20	62.5/125 um	980–1625 nm	2.85 (>3.0)	2 or 3	155, 622, 1063, 1250, 2125, 2488	(–20 dBm)
86105A (83485A)	1	12/20	9/125 um	980–1625 nm	20	1, 2 or 3	155, 622, 2488, 3125, 9953	(–10 dBm)
86106A (83485B)	1	18/40	9/125 um	980–1625 nm		1	9953	(–8 dBm)
86109A (83482A)	1	18 & 40	9/125 um	980–1625 nm	30			
86112A (83483A)	2	12 & 20						
54753A	1 TDR/ Elec. & 1 Elec.	12/18 and 12/20						
54754A	2 TDR/ Elec.	12/18						
Clock Recovery	Input	Operating Input Power Level for Clock Recovery	Insertion Loss	Data Rates for Clock recovery	Tracking/ Acquisition Range	Module Contributed Jitter (Characteristic)		
83491A	50 Ohm Electrical	–10 to +3 dBm	DC-2500 MHz: 7 dB 4500 MHz: 10 dB	155, 622, 1060, 1250, 2125, 2488, 2500 Mb/s	±0.1%	<0.0125 UI RMS (<0.01 UI RMS)		
83492A	62.5/125 um	750–860 nm: –10 to +3 dBm 1000–1600 nm: –13 to +3 dBm	≤5.0 dBm max	155, 622, 1060, 1250, 2125, 2488, 2500 Mb/s	±0.1%	<0.0125 UI RMS (<0.01 UI RMS)		
83493A	9/125 um	1000–1600 nm: –20 to +3 dBm	≤1.5 dBm max	155, 622, 1250, 2488, 2500 Mb/s	±0.1%	<0.0125 UI RMS (<0.01 UI RMS)		
82494A	9/125 um	1000–1600 nm: –10 to +3 dBm	≤1.5 dBm max	2488 and 9953 Mb/s				

Plastic Plastic Fiber Couplers (Splitters)



DESCRIPTION

Fiber couplers, or splitters, are special fiber optic devices with one or more input fibers for distributing optical signals into two or more output fibers. The optical light is passively split into multiple output signals (fibers), each containing light with properties identical to the original except for reduced amplitude. Because the splitter is a passive device it is immune to EMI, consumes no electrical power and does not add noise to system design. The splitter's passive design is bi-directional and operationally independent of wavelength, constrained only by the physical properties of the PMMA fiber core.

Fiber couplers have input and output configurations defined as $M \times N$. M is the number of input ports and is one or greater. N is the number of output ports and is always equal to or greater than M . When there are multiple inputs, output signals are always a combination of the input signals – a coupler can also be considered a combiner.

Fiber optic couplers or splitters are available in a wide range of styles and sizes to split or combine light with minimal loss. All couplers are manufactured using a very simple proprietary process that produces reliable, low-cost devices. They are physically rugged and insensitive to operating temperatures. Couplers can be fabricated in custom fiber lengths and/or with terminations of any type.

APPLICATIONS

- Feedback Control Circuits
- Ethernet and Automotive LANs
- Medical Instruments
- Automotive Electronics
- Optical Sensors
- Wavelength Multiplexing
- Audio Systems
- Electronic Games

FEATURES

- ◆ Light, Compact Design
- ◆ Standard Jacketed 1000 μm Core Plastic Fiber Cable
- ◆ High Isolation
- ◆ Light-Tight Stainless Steel Housing
- ◆ Low Loss
- ◆ Excellent Temperature Stability
- ◆ RoHS Compliant

MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Operating Temperature Range (TOP)..... -40° to 85°C

Storage Temperature Range (TSTG)..... -55° to 85°C

Fiber Bending Radius.....25 mm

Fiber Tensile Strength.....5 kg

FIBER CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Material: Fiber couplers are manufactured with Mitsubishi GH4001 1000 μm core jacketed step-index optical fiber. See website for detailed fiber specifications.

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Fiber Attenuation (650 nm light)	–	–	.14	.16	dB/m
Fiber N/A	–	–	.51	–	–
Core Refractive Index	–	–	1.492	–	–
Cladding Refractive Index	–	–	1.402	–	–

Plastic Plastic Fiber Couplers (Splitters)

CHARACTERISTICS

STOCK NUMBER	PORTS	SPLITTING RATIO %	INSERTION LOSS (MAX)	EXCESS LOSS (MAX)
IF-540	2 × 2	50:50	Port A - Port C 5.6 dB Port A - Port D 3.7 dB Port B - Port C 3.7 dB Port B - Port D 5.6 dB	Port A 1.6 dB Port B 1.6 dB
IF-541	2 × 2	80:20	Port A - Port C 9.9 dB Port A - Port D 2.9 dB Port B - Port C 2.9 dB Port B - Port D 9.9 dB	Port A 1.7 dB Port B 1.7 dB
IF-542	2 × 2	90:10	Port A - Port C 1.5 dB Port A - Port D 2.5 dB Port B - Port C 2.4 dB Port B - Port D 1.5 dB	Port A 2.0 dB Port B 2.0 dB
IF-562	1 × 2	50:50	Port A - Port C 5.6 dB Port A - Port D 3.7 dB	Port A 1.6 dB
IF-543	1 × 3	33:33:33	Port A - Port B 8.2 dB Port A - Port C 8.2 dB Port A - Port D 8.2 dB	Port A 2.2 dB
IF-544	4 × 4	25:25:25:25	— —	— —

All devices are available with ST®, SMA or Versalink fiber terminations.

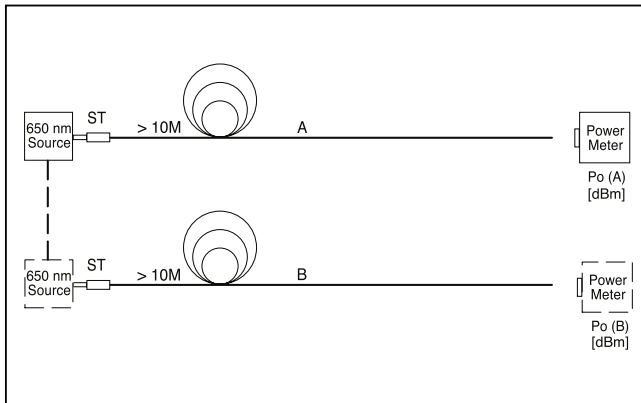


FIGURE 1. Reference measurement - (pre-fused)

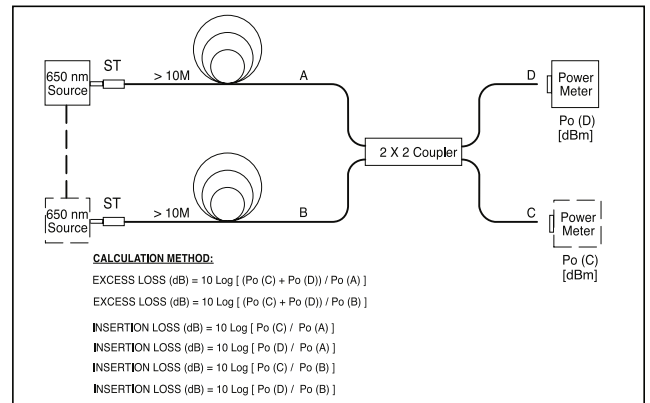


FIGURE 2. Excess & insertion loss measurement - (post-fused)

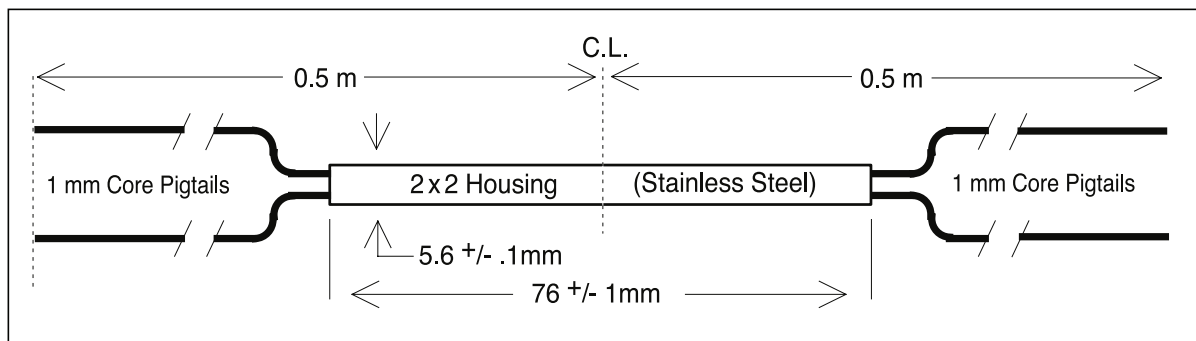


FIGURE 3. Overall Dimensions for 2 × 2 Coupler



[Home](#) / [Optical Power and Energy Meters](#) / Power and Energy Meter Interfaces with External Readout



Power and Energy Meter Interfaces with External Readout

- ▶ Compact Power Meter Interfaces with Various Output Connection Options
- ▶ Red C-Series Connector for Quick Sensor Exchange
- ▶ Ideal for Manufacturing Environments

Compatible with C-Type Sensors (Not Included with Console)



PM101
Photodiode and Thermal Power Sensor Interface with USB, RS232, and Analog Operation

PM101R
Photodiode and Thermal Power Sensor Interface with USB and RS232 Operation

PM100USB Power and Energy Sensor Interface with USB Operation

PM102A
Thermal Power and Position Sensor Interface with USB and Analog SMA Operation

PM103U
Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensor Interface with USB Operation

Related Items

- Compact USB Power Meters
- Power and Energy Meters
- Photodiodes & Detectors
- Microscope Slide Power Sensor

Overview **Specs** Feature Comparison Connectors Applications Software Sensor Selection Feedback Console Selection

Sensor Compatibility				
Item #	PM101 Series	PM102 Series	PM103 Series	PM100USB
Sensor Compatibility				
Compatible Sensor Types^a	Photodiode Power and Thermal Power	Thermal Power and Thermal Position & Power	Photodiode Power and Pyroelectric Energy	Photodiode Power, Thermal Power, and Pyroelectric Energy
Max Photodiode Sensor Current	5 mA	N/A	10 mA	5 mA
Max Thermal Sensor Voltage	1 V	1 V	N/A	1 V
Max Thermal Position Sensor Voltage	N/A	1 V	N/A	N/A
Max Pyroelectric Sensor Voltage	N/A	N/A	200 V	100 V
Photodiode Sensor Current Input				
Units	W, dBm, W/cm ² , A	N/A	W, dBm, W/cm ² , A	W, dBm, W/cm ² , A
Current Measurement Range	6 Decades: 50 nA, 500 nA, 5 μA, 50 μA, 500 μA, 5 mA; Range Selectable in W, Sensor Dependent	N/A	21 Ranges: nA: 2, 4, 10, 20, 40, 100, 200, 400; μA: 1, 2, 4, 10, 20, 40, 100, 200, 400; mA: 1, 2, 4, 10; Range Selectable in W, Sensor Dependent	6 Decades: 50 nA, 500 nA, 5 μA, 50 μA, 500 μA, 5 mA; Range Selectable in W or A, Sensor Dependent
Current Display Resolution	1 pA / Responsivity Value (A/W)	N/A	1 pA / Responsivity Value (A/W)	1 pA / Responsivity Value (A/W)
Current Measurement Uncertainty	±0.2% Full Scale (5 μA - 5 mA) ±0.5% Full Scale (50 nA)	N/A	±0.2% Full Scale (400 nA - 10 mA) ±0.5% Full Scale (2 nA - 200 nA)	±0.2% Full Scale (5 μA - 5 mA) ±0.5% Full Scale (50 nA)
Analog Bandwidth	DC - 100 kHz (Dependent on Sensor and Settings)	N/A	DC - 150 kHz (Dependent on Sensor and Settings)	DC - 100 kHz (Dependent on Sensor and Settings)
Wavelength Correction	nm (A/W)	N/A	nm (A/W)	nm (A/W)
Beam Area Setting	Diameter 1/e ² or Rectangular x,y	N/A	Diameter 1/e ² or Rectangular x,y	Diameter 1/e ²
AD Converter	16 bit	N/A	16 bit	16 bit
Thermal Sensor Voltage Input				
Units	W, dBm, W/cm ² , A	N/A	N/A	W, dBm, W/cm ² , V
Voltage Measurement Range	9 Ranges: 2, 4, 10, 20, 40, 100, 200, 400, 1000 mV; Range Selectable in W, Sensor Dependent	N/A	N/A	4 Decades: 1, 10, 100, 1000 mV Range selectable in W or V, Sensor Dependent
Voltage Display Resolution	1 μV / Responsivity Value (V/W)	N/A	N/A	1 μV / Responsivity Value (V/W)
Voltage Measurement Uncertainty	±0.5% Full Scale (10 mV - 1 V) ±1% Full Scale (2 mV, 4 mV)	N/A	N/A	±0.5% Full Scale (10 mV - 1 V) ±1% Full Scale (1 mV)
Analog Bandwidth	DC - 10 Hz (Dependent on Sensor and Settings)	N/A	N/A	DC - 10 Hz (Dependent on Sensor and Settings)
Wavelength Correction	Sensor Dependent; nm (V/W)	N/A	N/A	Sensor Dependent; nm (V/W)
Beam Area Setting	Diameter 1/e ² or Rectangular x,y	N/A	N/A	Diameter 1/e ²
Pyroelectric Sensor Voltage Input				
Units	N/A	N/A	J, J/cm ² , W, dBm, W/cm ² , V	J, J/cm ² , W, W/cm ² , V
Voltage Measurement Range	N/A	N/A	13 Ranges: mV: 20, 40, 100, 200, 400; V: 1, 2, 4, 10, 20, 40, 100, 200; Ranges Selectable in J, Sensor Dependent	4 Decades: 0.1, 1, 10, 100 V Range Selectable in J or V, Sensor Dependent
Voltage Display Resolution	N/A	N/A	100 μV / Responsivity Value (V/W)	100 μV / Responsivity Value (V/J)
Voltage Measurement Uncertainty	N/A	N/A	±0.5% Full Scale (1 V - 200 V) ±1% Full Scale (20 mV, 400 mV)	±0.5% Full Scale
Trigger Level	N/A	N/A	3% - 90% Full Scale	0.1 % to 99.9 % Full Scale
Repetition Rate	N/A	N/A	Single Shot - 80 kHz,	3 kHz



Sensor Temperature Measurement

Supported Temp. Sensor	Thermistor			
Temp. Measurement Range	-10 to 120 °C	-10 to 120 °C	-10 to 120 °C	-10 to 80 °C
Sensor Interface				

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy

English
 EUR

PM101K	(3.78" x 2.25" x 1.00")								
PM101U	93.6 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.68" x 2.25" x 1.00")								
PM102	96.5 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.80" x 2.25" x 1.00")	0 to 40 °C	-40 to 70 °C	0.16 kg (0.35 lb)	External PC; Windows® Application or Driver Set	Windows® Application Software Provided	1000 Hz	No	USB Cable Provided ^a
PM102A	100.0 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.94" x 2.25" x 1.00")								
PM102U	93.6 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.68" x 2.25" x 1.00")								
PM103	96.5 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.80" x 2.25" x 1.00")	0 to 40 °C	-40 to 70 °C	0.15 kg (0.33 lb)			1000 Hz		
PM103A	100.2 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.94" x 2.25" x 1.00")								
PM103U	93.6 x 57.2 x 25.4 mm ³ (3.68" x 2.25" x 1.00")								
PM100USB	93.1 x 60.4 x 28.7 mm ³ (3.67" x 2.38" x 1.13")	0 to 40 °C	-40 to 70 °C	0.15 kg (0.33 lb)			300 Hz		

a. PM101, PM102, and PM103 can also be powered by the DA-15 connector. See the *Connectors* tab for specifics.

Compatible Sensor Overview

Sensor Type	C-Series Photodiode Sensors, Photodiodes (Max 5 mA)	C-Series Thermal Power Sensors, Thermopiles (Max 1 V)	C-Series Thermal Position & Power Sensors	C-Series Pyroelectric Sensors, Pyros (Max 100 V)
Compatible Interfaces	PM101, PM101A, PM101R, PM101U, PM103, PM103A, PM103U, PM100USB	PM101, PM101A, PM101R, PM101U, PM102, PM102A, PM102U, PM100USB	PM102, PM102A, PM102U	PM103, PM103A, PM103U, PM100USB
Wavelength Ranges	200 nm - 5.5 µm	190 nm - 20 µm	190 nm - 20 µm	185 nm - 25 µm
Power / Energy Ranges	100 pW - 20 W	10 µW - 200 W	0.5 mW - 50 W	10 µJ - 15 J

For a full list of the sensor head specifications please visit the [Photodiode Power Sensors](#), [Thermal Power Sensors](#), [Thermal Position & Power Sensors](#), or [Pyroelectric Energy Sensors](#) pages. For other information, please contact [Tech Support](#).

Power Meter Interfaces for Photodiode and Thermal Power Sensors



Compatible with Over 25 Photodiode and Thermal Power Sensors
 All Models Feature USB 2.0 Operation
 Select Models with:
 • UART or RS232 Operation
 • Analog Output
 Power Supply via USB (All Models) or DA-15 Connector (PM101 Only)
 Includes Certificate of Calibration

[Zoom](#)

The PM101 Series Interfaces are compatible with all our C-Series photodiode and thermal power sensors. Our [standard photodiode](#), [slim photodiode](#), [integrating sphere](#), and [fiber](#) sensors can collectively measure optical powers from 100 pW to 20 W. Our [thermal power](#) sensors measure optical powers from 10 µW to 200 W. Alternatively, unamplified anode- or cathode-grounded photodiodes with up to 5 mA photocurrent and thermal elements with a maximum output voltage of 1 V can be used. While all of the interfaces can be operated and powered with a PC via the mini-USB port, select interfaces have additional features such as UART or RS232 operation and analog output (see the table to the right). Models with analog output can be operated autonomously when connected to a power supply, without the need for an additional control device. All of the interfaces include reset buttons, allowing the systems to be easily rebooted.

The non-volatile memory in each interface retains the user's wavelength setting, sensitivity range, and output configuration upon shutting down or rebooting the unit, suitable for repeat measurements over a long period of time. A fast readout rate of 1000 samples per second allows active signal monitoring while the interface is in use. For precise measurements with thermal power sensors, these interfaces use nine voltage measurement ranges from 2 mV to 1 V, compared to only four ranges used by the PM100USB (see the Specs tab).

Please note that sensors are not included with these power meter interfaces. For information about our compatible sensors, please see the sensor descriptions below. Thorlabs offers a recalibration service for these interfaces, which can be ordered below (see Item # CAL-PM1). Alternatively, if you have a corresponding sensor that requires recalibration, you can include the power meter interface with the sensor for recalibration at no additional cost. Also, we offer the [USB-ABL-60](#) cable as a replacement for the USB cable included with each sensor; this cable includes a locking screw to prevent accidental disconnects.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

Power Meter Interface Quick Comparison ^a				
Item #	PM101	PM101A	PM101R	PM101U
Photo (Click to Enlarge)				
Connectors	Mini USB & DA-15	Mini USB & SMA	Mini USB & DE-9	Mini USB
Control / Digital Output	USB 2.0, RS232, or UART	USB 2.0	USB 2.0 or RS232	USB 2.0
Analog				
Output	Yes	Yes	No	No

a. See the *Feature Comparison* tab for a full comparison.

	Qty <input type="text"/>		Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
	<input type="text"/>		PM101 Customer Inspired! Power Meter Interface with USB, RS232, UART, and Analog Operation	440,05 €	Today



Power Meter Interfaces for Thermal Power and Thermal Position Sensors



Compatible with Over 10 Thermal Power and Thermal Position & Power Sensors

Power Meter Interface Quick Comparison^a

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



without the need for an additional control device. All of the interfaces include reset buttons, allowing the systems to be easily rebooted. a. See the *Feature Comparison* tab for a full comparison.

The non-volatile memory in each interface retains the user's wavelength setting, sensitivity range, and output configuration upon shutting down or rebooting the unit, suitable for repeat measurements over a long period of time. A fast readout rate of 1000 samples per second allows active signal monitoring while the interface is in use. For precise measurements with thermal power sensors, these interfaces use nine voltage measurement ranges from 2 mV to 1 V, compared to only four ranges used by the PM100USB (see the Specs tab).

Please note that sensors are not included with these power meter interfaces. For information about our compatible sensors, please see the sensor descriptions below. Thorlabs offers a recalibration service for these interfaces, which can be ordered below (see Item # CAL-PM1). Alternatively, if you have a corresponding sensor that requires recalibration, you can include the power meter interface with the sensor for recalibration at no additional cost. Also, we offer the [USB-ABL-60](#) cable as a replacement for the USB cable included with each sensor; this cable includes a locking screw to prevent accidental disconnects.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1	Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
	<input type="text"/>		PM102 Thermal Sensor Interface with USB, RS232, UART, and Analog Operation	439,96 €	Today
	<input type="text"/>		PM102A Thermal Sensor Interface with USB and Analog Operation	430,87 €	Today
	<input type="text"/>		PM102U Thermal Sensor Interface with USB Operation	411,78 €	Today

Power and Energy Meter Interfaces for Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensors



Compatible with Over 20 Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensors
 All Models Feature USB 2.0 Operation
 Select Models with:
 • UART or RS232 Operation
 • Analog Output
 Power Supply via USB (All Models) or DA-15 Connector (PM103 Only)
 Includes Certificate of Calibration

The PM103 Series Interfaces are compatible with all our C-Series photodiode power and pyroelectric energy sensors. Our [standard photodiode](#), [slim photodiode](#), [integrating sphere](#), and [fiber](#) sensors can collectively measure optical

powers from 100 pW to 20 W. Alternatively, unamplified anode- or cathode-grounded photodiodes with currents up to 10 mA can be used. Our [pyroelectric energy](#) sensors can measure energies from 10 μJ to 15 J. Other energy sensors with voltage outputs from 20 mV to 200 V can also be used. While all of the interfaces can be operated and powered with a PC via the mini-USB port, select interfaces have additional features such as UART or RS232 operation and analog output (see the table to the right). Models with analog output can be operated autonomously when connected to a power supply, without the need for an additional control device. All of the interfaces include reset buttons, allowing the systems to be easily rebooted.

The non-volatile memory in each interface retains the user's wavelength setting, sensitivity range, and output configuration upon shutting down or rebooting the unit, suitable for repeat measurements over a long period of time. A fast readout rate of 100 kilosamples per second allows active signal monitoring while the interface is in use. For precise measurements, these interfaces use thirteen voltage measurement ranges from 20 mV to 200 V and 21 current measurement ranges from 2 nA to 10 mA, compared to only four voltage and six current ranges used by the PM100USB (see the Specs tab).

The PM103 has two configurable general purpose digital ports, DIO1 (DA-15 Pin 2) and DIO2 (DA-15 Pin 3). Similarly, the PM103A has one auxiliary digital port, DIO1, with an SMA connector. The DIO1 ports can be configured as trigger input or output when reading the data in the 100 kS/s mode. DIO2 can also be configured as a pass/fail flag and queried per remote control command.

Please note that sensors are not included with these power meter interfaces. For information about our compatible sensors, please see the sensor descriptions below. Thorlabs offers a recalibration service for these interfaces, which can be ordered below (see Item # CAL-PM1). Alternatively, if you have a corresponding sensor that requires recalibration, you can include the power meter interface with the sensor for recalibration at no additional cost. Also, we offer the [USB-ABL-60](#) cable as a replacement for the USB cable included with each sensor; this cable includes a locking screw to prevent accidental disconnects.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

Power Meter Interface Quick Comparison ^a			
Item #	PM103	PM103A	PM103U
Photo (Click to Enlarge)			
Connectors	Mini USB & DA-15	Mini USB & SMA	Mini USB
Control / Digital Output	USB 2.0, RS232, or UART	USB 2.0	USB 2.0
Analog Output	Yes	Yes	No

a. See the *Feature Comparison* tab for a full comparison.

+1	Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
	<input type="text"/>		PM103 NEW! Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensor Interface with USB, RS232, UART, and Analog Operation	563,58 €	Today
	<input type="text"/>		PM103A NEW! Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensor Interface with USB and Analog Operation	554,49 €	Lead Time
	<input type="text"/>		PM103U NEW! Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensor Interface with USB Operation	540,86 €	Today

Power and Energy Meter Interface for Photodiode, Thermal, and Pyroelectric Sensors

Compatible with Over 30 Photodiode, Thermal, and Pyroelectric Sensors
 Controlled and Powered via USB



elements with a maximum output voltage of 1 V can be used. Our [piezoelectric energy converter](#) can measure energies from 10 pJ to 10 J, as well as other energy sensors with voltage outputs from 100 mV to 100 V. This interface can be operated and powered by a PC via the mini-USB port. A readout rate of 300 samples per second allows active signal monitoring while the interface is in use.

Please note that sensors are not included with the PM100USB. For information about our compatible sensors, please see the sensor descriptions below. Thorlabs offers a recalibration service for the PM100USB, which can

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



Standard Photodiode Power Sensors

- For General Purpose Optical Power Measurements
- Integrated Viewing Target for Easy Sensor Alignment
- Ø9.5 mm Sensor Aperture
- Sensor, Protective Cap, IR Target, and Thread Adapter Included
- Fiber Adapters Available Separately (See Table Below)
- See the [FullWebPresentation](#) for More Information



[Click to Enlarge](#)

These Standard Photodiode Power Sensors are ideal for metering low power coherent and incoherent sources from the UV to the NIR. Each NIST-Traceable, calibrated sensor features an integrated viewing target for easy alignment, enhanced shielding against electromagnetic interference, an over-temperature-alert device, and a large Ø9.5 mm sensor aperture. The sensors are compatible with [30 mm cage systems](#), [Ø1/2" posts](#), and [SM1 \(1.035"-40\) lens tubes](#), and are ideal for free-space and fiber-coupled sources.

Thorlabs offers a recalibration service for these photodiode power sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-UPVD for UV-extended Si sensors, Item # CAL-PD for Si sensors and Item # CAL-IRPD for Ge sensors).

S120C and CP44F Quick-Release Mount

Item # ^a	S120VC	S120C	S121C	S122C ^h
Sensor Image (Click the Image to Enlarge)				
Aperture Size	Ø9.5 mm			
Wavelength Range	200 - 1100 nm	400 - 1100 nm	400 - 1100 nm	700 - 1800 nm
Power Range	50 nW - 50 mW		500 nW - 500 mW	50 nW - 40 mW
Detector Type	Si Photodiode (UV Extended)	Si Photodiode		Ge Photodiode
Linearity	±0.5%			
Resolution ^b	1 nW		10 nW	2 nW
Measurement Uncertainty ^c	±3% (440 - 980 nm) ±5% (280 - 439 nm) ±7% (200 - 279 nm, 981 - 1100 nm)	±3% (440 - 980 nm) ±5% (400 - 439 nm) ±7% (981 - 1100 nm)		±5%
Responsivity ^d (Click for Plot)	 RawData	 RawData	 RawData	 RawData
Coating/Diffuser	Reflective ND (OD1.5) ^e	Reflective ND (OD1) ^f	Reflective ND (OD2) ^g	Absorptive ND (Schott NG9)
Head Temperature Measurement	NTC Thermistor 4.7 kΩ			
Housing Dimensions	Ø30.5 mm x 12.7 mm			
Cable Length	1.5 m			
Post Mounting ^{e,f,g}	Universal 8-32 / M4 Tap, Post Not Included			
Aperture Thread	External SM1 (1.035"-40)			
Compatible Fiber Adapters	S120-FC , S120-APC , S120-SMA , S120-ST , S120-LC , and S120-SC (Not Included)			
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , PM100A , and PM320E			
Compatible Interfaces	PM101 , PM101A , PM101R , PM101U , PM103 , PM103A , PM103U , and PM100USB			

- a. For complete specifications, please see the [Specs tab here](#).
- b. Measured with PM100D console in low bandwidth setting.
- c. Beam diameter > 1 mm.
- d. All sensor responsivities are calibrated to a NIST-traceable source with measurements taken in 5 nm intervals.
- e. For the S120VC, these specifications are valid for devices with serial numbers 1203xxx or higher. Older versions had a reflective ND diffuser (OD1). Additionally, they came with an 8-32 tap and M4 adapter. For additional information, please contact [technicalsupport](#).
- f. For the S120C, these specifications are valid for devices with serial numbers 1203xxx or higher. Older versions had an absorptive ND diffuser (Schott NG3). Additionally, they came with an 8-32 tap and M4 adapter. For additional information, please contact [technicalsupport](#).
- g. For the S121C, these specifications are valid for devices with serial numbers 1203xxx or higher. Older versions had an absorptive ND diffuser (Schott NG9). Additionally, they came with an 8-32 tap and M4 adapter. For additional information, please contact [technicalsupport](#).
- h. Previously, S122C came with an 8-32 tap and M4 adapter. For additional information, please contact [technicalsupport](#).

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1	Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
	<input type="text"/>		S120VC Standard Photodiode Power Sensor, UV-Extended Si, 200 - 1100 nm, 50 mW	409,20 €	LeadTime
	<input type="text"/>		S120C Standard Photodiode Power Sensor, Si, 400 - 1100 nm, 50 mW	295,10 €	5-8Days
	<input type="text"/>		S121C Standard Photodiode Power Sensor, Si, 400 - 1100 nm, 500 mW	320,68 €	Today



The S170C Microscope Slide Power Sensor Head is a silicon photodiode sensor designed to measure the power at the sample in microscopy setups. The silicon photodiode can detect wavelengths between 350 nm and 1100 nm at optical powers between 10 nW and 150 mW. The sensor head's 76.0 mm x 25.2 mm footprint matches that of a standard microscope slide and is compatible with most standard upright

Sensor Image
(Click Image to Enlarge)



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy



Sensor specifications and the NIST- and PTB-traceable calibration data are stored in non-volatile memory in the sensor connector and can be read out by the latest generation of Thorlabs power meters. We recommend yearly recalibration to ensure accuracy and performance. Calibration may be ordered using the CAL-PD recalibration service available below. Please contact [technical support](#) for more information.

Thorlabs also offers a Microscope Slide Sensor Head with a [thermal sensor](#); for complete specifications, the full presentation can be found [here](#).

Resolution	1 nW
Calibration Uncertainty ^c	±3% (440 - 980 nm) ±5% (350 - 439 nm) ±7% (981 - 1100 nm)
Responsivity ^d (Click for Plot)	 RawData
Neutral Density Filter	Reflective (OD 1.5)
Cable Length	1.5 m
Post Mounting	Universal 8-32 / M4 Tap, Post Not Included
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , PM100A , and PM320E PM101 .
Compatible Interfaces	PM101A , PM101R , PM101U , PM103 , PM103A , PM103U , and PM100USB

- a. For complete specifications, please see the [Specs](#) tab [here](#).
- b. Measured with PM100D console in low bandwidth setting.
- c. Beam diameter > 1 mm.
- d. All sensor responsivities are calibrated to a NIST-traceable source with measurements taken in 5 nm intervals.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1

Qty

Docs

Part Number - Universal

Price ex VAT

Available





[S170C](#) Customer Inspired! Microscope Slide Power Sensor, 350 - 1100 nm, 150 mW

1,096.76 €

[LeadTime](#)

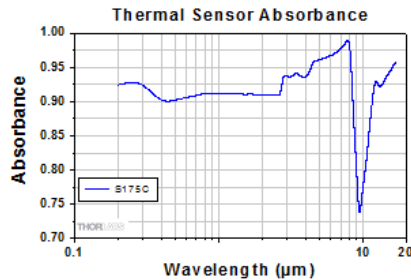
Add To Cart

Microscope Slide Thermal Power Sensor

Wavelength Range: 300 nm - 10.6 μm
Sensitive to Optical Powers from 100 μW to 2 W
Designed to Measure Optical Power in the Sample Plane of a Microscope
Thermal Sensor with 18 mm x 18 mm Active Area
76.0 mm x 25.2 mm Footprint Matches Standard Microscope Slides
Information Stored in Connector

- o Sensor Data
- o NIST- and PTB-Traceable Calibration Data

 See the [FullWebPresentation](#) for More Information



Typical absorption curve for the S175C (glass and absorber). Note that this curve is representative, and the actual absorption across the spectrum will vary from unit to unit.



The back of the S175C housing is engraved with the sensor specifications and a target for centering the beam on the sensor.

The S175C Microscope Slide Thermal Power Sensor Head is designed to measure the power at the sample in microscopy setups. The thermal sensor can detect wavelengths between 300 nm and 10.6 μm at optical powers between 100 μW and 2 W. The sensor head's 76.0 mm x 25.2 mm footprint matches that of a standard microscope slide and is compatible with most standard upright and inverted microscopes.

The thermal sensor has an 18 mm x 18 mm active area and is contained in a sealed housing behind a glass cover. An immersion medium (water, glycerol, oil) may be placed over the glass cover plate.

As seen in the image to the right, the bottom of the sensor housing features a laser-engraved target to aid in aligning and focusing the beam. In standard microscopes, the target can be used for beam alignment before flipping the sensor head to face the objective for power measurements. In inverted microscopes, turn on the trans-illumination lamp and align the target on the detector housing with the beam; this will center the sensor in front of the objective.

Sensor specifications and the NIST- and PTB-traceable calibration data are stored in non-volatile memory in the sensor connector and can be read out by the latest generation of Thorlabs power meters. We recommend yearly recalibration to ensure accuracy and performance. Calibration may be ordered using the CAL-THPY recalibration service available below. Please contact [technical support](#) for more information.

Thorlabs also offers a Microscope Slide Sensor Head with a [photodiode sensor](#) for low-power, high-resolution measurements; the full presentation may be found [here](#).

Item # ^a	S175C
Sensor Image (Click Image to Enlarge)	
Active Detector Area	18 mm x 18 mm
Wavelength Range	0.3 - 10.6 μm
Power Range	100 μW - 2 W
Detector Type	Thermal Surface Absorber (Thermopile)
Linearity	±0.5%
Resolution ^b	10 μW
Measurement Uncertainty ^c	±3% @ 1064 nm; ±5% @ 300 nm - 10.6 μm
Response Time	3 s (<2 s from 0 to 90%)
Housing Dimensions	76 mm x 25.2 mm x 4.8 mm (2.99" x 0.99" x 0.19")
Cable Length	1.5 m
Housing Features	Integrated Glass Cover Engraved Laser Target on Back
Post Mounting	N/A
Cage Mounting	N/A
Aperture Thread	N/A
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , PM100A , and PM320E
Compatible Interfaces	PM101 , PM101A , PM101R , PM101U , PM102 , PM102A , PM102U , and PM100USB

- a. For complete specifications, please see the [Specs](#) tab [here](#).
- b. Measured with the legacy PM200 Touch Screen Console
- c. Beam Diameter: >1 mm



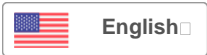
Integrating Sphere Photodiode Power Sensors

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy



around the entrance aperture. These sensors use either a silicon photodiode for detection in the 350 - 1100 nm range or an InGaAs photodiode for detection in the 800 - 1700 nm, 900 - 1650 nm, or 1200 - 2500 nm wavelength range. Separately

The S180C integrating sphere for 2.9 - 5.5 μm uses two connected, gold-plated Ø20 mm spheres, with an entrance port in the first sphere and a port for the MCT (HgCdTe) detector located in the second sphere. Compared to single-sphere designs, the two-sphere configuration improves device sensitivity by minimizing the internal sphere surface area while still effectively shielding the detector from direct illumination. This design reduces the effect of input angle, divergence, and beam shape on the measurement result by effectively shielding the photodiode without the use of a baffle or other shielding mechanism.

The integrating spheres below feature large Ø5 mm, Ø7 mm, or Ø12 mm apertures, externally SM1-threaded (1.035"-40) front connections, enhanced shielding against electromagnetic interference, and an over-temperature alert sensor. Because of the large active detector areas of these sensors, the included S120-FC fiber adapter can be used with FC/PC- or FC/APC-terminated fiber. The externally SM1-threaded adapter can be removed using a size 1 screwdriver to place components closer to the window. NIST-traceable data is stored in the sensor connector.

Thorlabs offers a recalibration service for these photodiode power sensors, which can be ordered below. See Item # CAL-PD for Si sensors, Item # CAL-IRPD for InGaAs sensors, and Item # CAL-MIRPD for extended InGaAs or MCT sensors.

Item # ^a	S140C	S142C	S144C	S145C	S146C	S148C	S180C
Sensor Image (Click the Image to Enlarge)							
Aperture	Ø5 mm	Ø12 mm	Ø5 mm	Ø12 mm		Ø5 mm	Ø7 mm
Wavelength Range	350 - 1100 nm		800 - 1700 nm		900 - 1650 nm	1200 - 2500 nm	2.9 μm - 5.5 μm
Power Range	1 μW - 500 mW	1 μW - 5 W	1 μW - 500 mW	1 μW - 3 W	10 μW - 20 W	1 μW - 1 W	1 μW - 3 W
Detector Type	Si Photodiode			InGaAs Photodiode		Extended InGaAs Photodiode	MCT (HgCdTe) Photodiode
Linearity	±0.5%						
Resolution ^b	1 nW			10 nW		1 nW	10 nW
Measurement Uncertainty ^c	±3% (440 - 980 nm) ±5% (350 - 439 nm) ±7% (981 - 1100 nm)			±5%			
Responsivity ^d (Click for Plot)							
Integrating Sphere Material (Size)	Zenith® PTFE (Ø1")	Zenith® PTFE (Ø2")	Zenith® PTFE (Ø1")	Zenith® PTFE (Ø2")		Zenith® PTFE (Ø1")	Gold Plating (Two Ø20 mm Spheres)
Head Temperature Measurement	NTC Thermistor 4.7 kΩ						
Housing Dimensions	Ø45 mm x 30.5 mm	70 mm x 74 mm x 70 mm	Ø45 mm x 30.5 mm	70 mm x 74 mm x 70 mm		Ø45 mm x 30.5 mm	59.0 mm x 50.0 mm x 28.5 mm
Cable Length	1.5 m						
Post Mounting	8-32 and M4 Taps						
Aperture Thread	Included Adapter with SM1 (1.035"-40) External Thread						
Compatible Fiber Adapters	S120-FC (Included) S120-APC, S120-SMA, S120-ST, S120-SC, S120-LC, and S140-BFA Bare Fiber Adapter (Not Included)						
Compatible Consoles	PM400, PM100D, PM100A, and PM320E						
Compatible Interfaces	PM101, PM101A, PM101R, PM101U, PM103, PM103A, PM103U, and PM100USB						

a. For complete specifications, please see the Specs tab [here](#).

b. Measured with PM100D console in low bandwidth setting.

c. Beam diameter > 1 mm

d. All sensor responsivities are calibrated to a NIST-traceable source with measurements taken in 5 nm intervals except for the S180C. See the S180C responsivity graph to see the NIST-traceable reference points.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1 Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
<input type="text"/>		S140C Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, Si, 350 - 1100 nm, 500 mW	677,73 €	5-8Days
<input type="text"/>		S142C Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, Si, 350 - 1100 nm, 5 W	940,36 €	LeadTime
<input type="text"/>		S144C Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, InGaAs, 800 - 1700 nm, 500 mW	795,77 €	LeadTime
<input type="text"/>		S145C Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, InGaAs, 800 - 1700 nm, 3 W	976,77 €	LeadTime
<input type="text"/>		S146C Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, InGaAs, 900 - 1650 nm, 20 W	976,77 €	5-8Days
<input type="text"/>		S148C Customer Inspired! Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, Extended InGaAs, 1200 - 2500 nm, 1 W	817,41 €	Lead Time
<input type="text"/>		S180C Integrating Sphere Photodiode Power Sensor, MCT (HgCdTe), 2.9 - 5.5 μm, 3 W	3.553,91 €	Today

Add To Cart

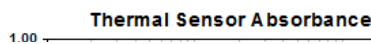
Fiber Photodiode Power Sensors



SM05 lens tubes, and it can also connect directly to Thorlabs' [30 mm Cage Systems](#).

Temperature Sensor (In Sensor Head)	NTC Thermistor	NTC Thermistor
Cable Length	1.5 m	
Post Mounting	Universal 8-32 / M4 Taps	Universal 8-32 / M4 Taps

Thorlabs offers a recalibration service for these sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-THPY).



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc. -

[Careers Site](#)

[Index Privacy](#)

[Policy](#)



- b. For conditions of intermittent use, with a maximum exposure time of 20 minutes for the S401C. The S405C saturates for optical input powers >5 W.
- c. Measurement taken with the legacy PM200 console for the S401C and the PM400 console for the S405C. In all cases, the acceleration circuit was switched off. Resolution performance will be similar with our other power meter consoles.
- d. Defined as the measurement uncertainty during calibration at the specified wavelengths for a beam diameter > 1 mm. The ±3% specification was determined by laser calibration, and the ±5% specification was determined through spectral calibration, in which values were interpolated using the laser calibration data and the absorption curve for the absorber. Calibration can be performed at 10.6 µm upon request.
- e. Typical natural response time (0 - 95%). Our power consoles can provide estimated measurements of optical power on an accelerated time scale (typically <1 s). See the *Operation* tab for additional information.

[Click to Enlarge](#)

The S405 shares the same absorption curve with the S415C, S425C, and S245C-L. (All are sold below.)

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1 Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
<input type="text"/>		S401C Thermal Power Sensor Head, Surface Absorber, 0.19 - 20 µm, 1 W, Ø10 mm	714,13 €	LeadTime
<input type="text"/>		S405C Thermal Power Sensor Head, Surface Absorber, 0.19 - 20 µm, 5 W, Ø10 mm	678,90 €	5-8Days

Add To Cart

Thermal Sensors for Max Powers of 10 W

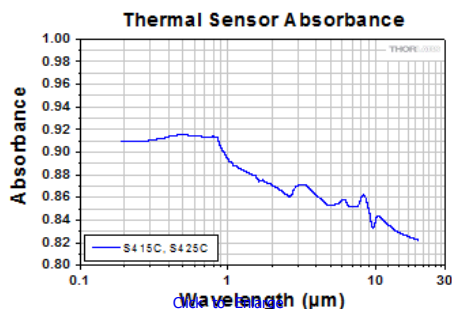
Item # ^a	S415C	S425C
Wavelength Range	190 nm - 20 µm	190 nm - 20 µm
Optical Power Range	2 mW - 10 W (20 W ^b)	2 mW - 10 W (20 W ^b)
Input Aperture Size	Ø15 mm	Ø25.4 mm
Active Detector Area	Ø15 mm	Ø27 mm
Max Optical Power Density	1.5 kW/cm ² (Avg.)	1.5 kW/cm ² (Avg.)
Detector Type	Thermal Surface Absorber (Thermopile)	
Linearity	±0.5%	±0.5%
Resolution ^c	100 µW	100 µW
Measurement Uncertainty ^d	±3% @ 1064 nm ±5% @ 250 nm - 17 µm	±3% @ 1064 nm ±5% @ 250 nm - 17 µm
Response Time ^e	0.6 s	0.6 s
Cooling	Convection (Passive)	
Housing Dimensions (Without Adapter)	50.8 mm x 50.8 mm x 35.0 mm (2.00" x 2.00" x 1.38")	50.8 mm x 50.8 mm x 35.0 mm (2.00" x 2.00" x 1.38")
Temperature Sensor (In Sensor Head)	NTC Thermistor	
Cable Length	1.5 m	
Post Mounting	Universal 8-32 / M4 Taps (Post Not Included)	Universal 8-32 / M4 Taps (Post Not Included)
30 mm Cage Mounting	-	-
Aperture Threads	Internal SM1	Internal SM1
Removable Heatsink	Yes	Yes
Accessories	Externally SM1-Threaded Adapter	Externally SM1-Threaded Adapter
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , PM100A , and PM320E	
Compatible Interfaces	PM101 , PM101A , PM101R , PM101U , PM102 , PM102A , PM102U and PM100USB	

- 100 µW Optical Power Resolution
- Thermistors Used to Monitor Temperature of Sensor Head
- Removable Heat Sinks Included
- See the [FullWebPresentation](#) for More Information

These thermal power sensors are designed for general broadband power measurements of low and medium power light sources. All include an externally SM1-threaded (1.035"-40) adapter, with threading concentric with the input aperture. The adapters are useful for mounting [Ø1" Lens Tubes](#) and Fiber Adapters (available below). The apertures of the S415C and S425C have internal SM1 threading.

These sensors operate with fast (<0.6 s) natural response times, and their removable heat sinks provide a high degree of flexibility to those interested in integrating them into custom setups or replacing the included heat sink with one that is water or fan cooled. If replacing the heat sink, please note that the replacement must provide heat dissipation adequate for the application.

Thorlabs offers a recalibration service for these sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-THPY).



The absorption curves of each of the thermal power sensors designed for use with low and medium power optical sources.

- a. For complete specifications, please see the *Specs* tab [here](#).
- b. Two Minute Maximum Exposure Time
- c. Measurement taken with the PM400 with the acceleration circuit switched off. Resolution performance will be similar with our other power meter consoles.
- d. Defined as the measurement uncertainty during calibration at the specified wavelengths for a beam



enabled. See the [Operation](#) tab for additional information.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1 Qty Docs Part Number - Universal

Price ex VAT Available

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy

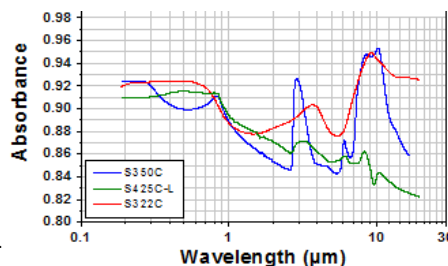


- S350C Has Ø40 mm Aperture Well Suited to Excimer and Other Lasers with Large Spot Sizes
- S425C-L Features Removable Heat Sink
- S322C is Fan Cooled with an Optical Power Range up to 200 W
- See the [FullWebPresentation](#) for More Information

These thermal power sensors are designed for general broadband power measurements of low and medium power light sources. With the exception of the S350C, all include an adapter with external SM1 (1.035"-40) threading concentric with the input aperture. This allows the sensors to be integrated into existing [Ø1" lens tube systems](#), in addition to being compatible with fiber adapters (available below). The aperture of the S425C-L has internal SM1 threading.

The S425C-L operates with a fast (<0.6 s) natural response time and has a removable heat sink, which provides a high degree of flexibility to those interested in integrating them into custom setups or replacing the included heat sink with one that is water or fan cooled. If replacing the heat sink, please note that the replacement must provide heat dissipation adequate for the application.

Thorlabs offers a recalibration service for these sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-THPY).



The absorption curves of each of the thermal power sensors designed for use with low and medium power optical sources.

Item # ^a	S350C	S425C-L	S322C
Sensor Image (Click Image to Enlarge)			
Wavelength Range	190 nm - 1.1 µm, 10.6 µm	190 nm - 20 µm	250 nm - 11 µm
Optical Power Range	10 mW - 40 W (60 W ^b)	2 mW - 50 W (75 W ^b)	100 mW - 200 W (250 W ^b)
Input Aperture Size	Ø40 mm	Ø25.4 mm	Ø25 mm
Active Detector Area	Ø40 mm	Ø27 mm	Ø25 mm
Max Optical Power Density	2 kW/cm ² (Avg.)	1.5 kW/cm ² (Avg.)	4 kW/cm ² (Avg., CO ₂)
Detector Type	Thermal Surface Absorber (Thermopile)		
Linearity	±1%	±0.5%	±1%
Resolution ^c	1 mW	100 µW	5 mW
Measurement Uncertainty ^d	±3% @ 351 nm ±5% @ 190 nm - 1100 nm	±3% @ 1064 nm ±5% @ 250 nm - 17 µm	±3% @ 1064 nm ±5% @ 266 nm - 1064 nm
Response Time ^e	9 s (1 s from 0 to 90%)	0.6 s	5 s (1 s from 0 to 90%)
Cooling	Convection (Passive)		Forced Air with Fan ^f
Housing Dimensions (Without Adapter, if Applicable)	100 mm x 100 mm x 54.2 mm (3.94" x 3.94" x 2.13")	100.0 mm x 100.0 mm x 58.0 mm (3.94" x 3.94" x 2.28")	100 mm x 100 mm x 86.7 mm (3.94" x 3.94" x 3.41")
Temperature Sensor (In Sensor Head)	NTC Thermistor		
Cable Length	1.5 m		
Post Mounting	M6 Threaded Taps, Includes Ø1/2" Post, 75 mm Long	Universal 8-32 / M4 Taps (Post Not Included)	M6 Threaded Taps, Includes Ø1/2" Post, 75 mm Long
30 mm Cage Mounting	-	-	Four 4-40 Tapped Holes
Aperture Threads	-	Internal SM1	-
Removable Heatsink	-	Yes	-
Accessories	-	Externally SM1-Threaded Adapter	Externally SM1-Threaded Adapter
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , PM100A , and PM320E		
Compatible Interfaces	PM101 , PM101A , PM101R , PM101U , PM102 , PM102A , PM102U and PM100USB		

a. For complete specifications, please see the [Specs](#) tab [here](#).
 b. Two Minute Maximum Exposure Time
 c. Measurement taken with the PM100D console, except for the S425C-L in which the PM400 was used. In all cases, the acceleration circuit was switched off. Resolution performance will be similar with our other power meter consoles.
 d. Defined as the measurement uncertainty during calibration at the specified wavelengths for a beam diameter > 1 mm. The ±3% specification was determined by laser calibration, and the ±5% specification was determined through spectral calibration, in which values were interpolated using the laser calibration data and the absorption curve for the absorber. Calibration can be performed at 10.6 µm upon request.
 e. Typical natural response time (0 - 95%). Our power consoles can provide estimated measurements of optical power on an accelerated time scale (typically <1 s) for the S350C and S322C. As the natural response time of the S425C-L is fast, the S425C-L does not benefit from acceleration and this function cannot be enabled. See the [Operation](#) tab for additional information.
 f. 12 VDC power supply is included.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1 Qty Docs Part Number - Universal

Price ex VAT Available

Thermal Power Sensor Head, Surface Absorber, 0.19 - 1.1 µm and 10.6 µm, 40 W,



Thermal Sensors for High Max Power Density Laser Pulses

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy



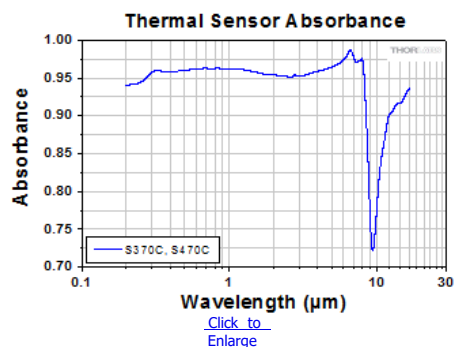
Optical Power Range	10 mW - 10 W (15 W ^b)	100 µW - 5 W (Pulsed and CW)
Input Aperture Size	Ø25 mm	Ø15 mm
Active Detector Area	Ø25 mm	Ø16 mm
Max Optical Power Density	35 W/cm ² (Avg.); 100 GW/cm ² (Peak)	
Detector Type	Thermal Volume Absorber (Thermopile)	
Linearity	±1%	±0.5%
Resolution^c	250 µW	10 µW
Measurement Uncertainty^d	±3% @ 1064 nm ±5% @ 400 nm - 1064 nm	±3% @ 1064 nm ±5% @ 250 nm - 10.6 µm
Response Time^e	45 s (3 s from 0 to 90%)	6.5 s (<2 s from 0 to 90%)
Cooling	Convection (Passive)	
Housing Dimensions (Without Adapter, if Applicable)	75 mm x 75 mm x 51.2 mm (2.95" x 2.95" x 2.02")	45.0 mm x 45.0 mm x 18.0 mm (1.77" x 1.77" x 0.71")
Temperature Sensor (In Sensor Head)	N/A	N/A
Cable Length	1.5 m	
Post Mounting	M6 Threaded Taps, Includes Ø1/2" Post, 75 mm Long	Universal 8-32 / M4 Tap (Post Not Included)
30 mm Cage Mounting	Four 4-40 Tapped Holes	-
Aperture Threads	-	External SM1
Accessories	Externally SM1-Threaded Adapter	-
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , PM100A , and PM320E	
Compatible Interfaces	PM101 , PM101A , PM101R , PM101U , PM102 , PM102A , PM102U and PM100USB	

have damaged the absorption coating of a thermal surface absorber are safely measured by these thermal volume absorbers.

The S370C features a large Ø25 mm aperture ideal for large-spot-size beams, and it is compatible with average powers from 10 mW to 10 W (CW).

In comparison, the S470C is faster, as the glass absorber volume is reduced and other design parameters have been optimized for speed. This results in a different optical power range, with the ability to measure powers down to 100 µW. The Ø15 mm aperture is of the S470C is smaller, and it has a lower max average power of 5 W. Its 10 µW resolution is better than the 250 µW resolution of the S370C.

Thorlabs offers a recalibration service for these sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-THPY).



This absorption curve is shown over a broader wavelength range than the sensors' operating ranges. See the table for the operating wavelength range of each sensor.

- a. For complete specifications, please see the Specs tab [here](#).
- b. Two Minute Maximum Exposure Time
- c. Measurement taken with the PM100D console for the S370C and with the legacy PM200 for the S470C. In all cases, the acceleration circuit was switched off. Resolution performance will be similar with our other power meter consoles.
- d. Defined as the measurement uncertainty during calibration at the specified wavelengths for a beam diameter > 1 mm. The ±3% specification was determined by laser calibration, and the ±5% specification was determined through spectral calibration, in which values were interpolated using the laser calibration data and the absorption curve for the absorber. Calibration can be performed at 10.6 µm upon request.
- e. Typical natural response time (0 - 95%). Our power consoles can provide estimated measurements of optical power on an accelerated time scale (typically <2 s). See the *Operation* tab for additional information.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1 Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
<input type="text"/>		S370C Thermal Power Sensor Head, Volume Absorber, 0.4 - 5.2 µm, 10 W, Ø25 mm	1.096,76 €	5-8Days
<input type="text"/>		S470C Thermal Power Sensor Head, Volume Absorber, 0.25 - 10.6 µm, 0.1mW - 5W, Ø15 mm	1.116,43 €	Today

Thermal Position & Power Sensors

Item # ^a	S440C	S442C
Sensor Image (Click the Image to Enlarge)		
Wavelength Range	190 nm - 20 µm	
Optical Power Range	0.5 mW - 5 W	10 mW - 50 W
Input Aperture Size	17 mm x 17 mm	Ø17.5 mm
Max Optical Power Density	1.5 kW/cm ²	
Detector Type	Four Thermopiles in Quadrant Configuration	

Segmented Quadrant Position-Sensing Detector
 S440C: High Sensitivity; 30 mm Cage System Compatible
 S442C: High Power; Heat Sink Included
 See the [FullWebPresentation](#) for More Information

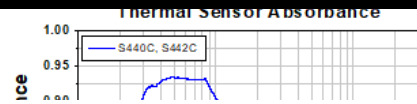
The S440C and S442C position sensors use thermopiles to obtain high-resolution measurements of a beam's position and power. The detector area consists of four thermopile-based sensors arranged as quadrants of a square. The quadrants are mechanically coupled but electrically isolated; thus, heat is free to flow across the entire active area, but the signal from each quadrant measures the response in only that quadrant's thermopile. The XY position of the beam is determined by comparing the signal intensity measured for each quadrant.

The S440C detector is optimized for high sensitivity from 0.5 mW to 5 W. The housing features four Ø6 mm through holes for compatibility with [30 mm cage systems](#), as well as an 8-32 / M4 universal tap for post mounting. The S442C detector is compatible with higher power levels from 10 mW up to 50 W. The housing includes a heat sink for superior heat dissipation, as well as two 8-32 / M4 universal taps for post mounting.

Both detectors feature C-Series connectors which contain NIST- and PTB-traceable



Position Accuracy ^d	30 µm (Ø1 mm Circle)	100 µm (Ø1 mm Circle)
	200 µm (Ø6 mm Circle)	300 µm (Ø6 mm Circle)
Position Repeatability ^d	15 µm (Ø1 mm Circle)	25 µm (Ø1 mm Circle)
	100 µm (Ø6 mm Circle)	150 µm (Ø6 mm Circle)



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy



Compatible Consoles [PM400](#), [PM102](#), [PM102A](#), and [PM102U](#)

capable of operating at up to 20 µm.

- a. For complete specifications, please see the [Specs](#) tab [here](#).
- b. Measured Using the PM400 Console with Acceleration Circuit Switched Off
- c. Beam Diameter > 1 mm
- d. Valid within the Specified Area at the Center of the Sensor
- e. Typical Natural Response Time (0 - 95%)

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1	Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
	<input type="text"/>		S440C Thermal Power Sensor Head, Position Sensing, 0.19 - 20 µm, 5 W, 17 mm x 17 mm	1.163,52 €	LeadTime
	<input type="text"/>		S442C Thermal Power Sensor Head, Position Sensing, 0.19 - 20 µm, 50 W, Ø17.5 mm	1.027,17 €	Today

Pyroelectric Energy Sensors

- For General Purpose and High Energy Optical Pulse Measurements
- Black Broadband Coating with Flat Response Over a Wide Wavelength Range
- Ceramic Coating with High Damage Thresholds for High-Energy-Density Lasers
- Sensor Areas from Ø11 mm to Ø45 mm
- BNC Connector for Oscilloscope Use
- C-Series Connector Adapter for Use with Compatible Thorlabs Consoles and Interfaces (See Table Below)
- See the [FullWebPresentation](#) for More Information



[Click to Enlarge](#). ES220C Sensor Mounted in a 30 mm Cage System

These Pyroelectric Sensors are designed to measure pulsed coherent and incoherent sources. Pyroelectric sensors are not suited for CW measurements, as they convert energy from light pulses into voltage pulses. A black broadband or ceramic coating is used for low or high power measurements, respectively. Large sensor areas from Ø11 mm - Ø45 mm allow easy alignment. The energy sensors features BNC connectors for use with an oscilloscope, as well as standard power meter connectors which contain NIST and PTB-traceable calibration data.

These sensors are not compatible with the PM100A Analog Power Meter Console or the PM101 Series Power Meter Interfaces.

Thorlabs offers a recalibration service for these energy sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-THPY).

Item # ^a	ES111C	ES120C	ES145C	ES220C	ES245C
Sensor Image (Click the Image to Enlarge)					
Aperture Size	Ø11 mm	Ø20 mm	Ø45 mm	Ø20 mm	Ø45 mm
Wavelength Range	0.185 - 25 µm				
Energy Range	10 µJ - 150 mJ	100 µJ - 500 mJ	500 µJ - 2 J	500 µJ - 3 J	1 mJ - 15 J
Detector Type	Pyroelectric Energy Sensor with Black Broadband Coating			Pyroelectric Energy Sensor with Ceramic Coating	
Resolution	100 nJ	1 µJ	1 µJ	25 µJ	50 µJ
Linearity	±1%				
Measurement Uncertainty	±5% @ 0.185 - 25 µm				
Housing Dimensions	Ø36 mm x 16 mm	Ø50 mm x 18 mm	Ø75 mm x 21 mm	Ø50 mm x 18 mm	Ø75 mm x 21 mm
Cable Length	1.5 m				
Post Mounting	8-32 Mounting Thread, 8-32 and M4 Insulating Adapters Included				
Cage Mounting	N/A	Four 4-40 Taps for 30 mm Cage Systems	N/A	Four 4-40 Taps for 30 mm Cage Systems	N/A
Compatible Consoles	PM400 , PM100D , and PM320E				
Compatible Interfaces	PM103 , PM103A , PM103U , and PM100USB				

a. For complete specifications, please see the [Specs](#) tab [here](#).

Based on your currency / country selection, your order will ship from Munich, Germany

+1	Qty	Docs	Part Number - Universal	Price ex VAT	Available
	<input type="text"/>		ES111C Pyroelectric Energy Sensor, Broadband Coating, 0.185 - 25 µm, 150 mJ	1.247,26 €	Today
	<input type="text"/>		ES120C Pyroelectric Energy Sensor, Broadband Coating, 0.185 - 25 µm, 500 mJ	1.298,41 €	Today
	<input type="text"/>		ES145C Pyroelectric Energy Sensor, Broadband Coating, 0.185 - 25 µm, 2 J	1.499,07 €	Today

Fiber Power Head with Silicon Detector



S150C

Description

The S150C power head is designed for fiber based applications in the VIS and NIR wavelength range without having a disturbing cable between sensor head and power meter console. The head is spectrally calibrated over the whole wavelength operating range and detects light from nano watts up to 5mW.

The S150C comes with FC and SMA fiber adapters. Other fiber adapters like SMA, ST, LC and SC are available as accessory and can be easily changed without tools. The sensor housing is equipped with a sub-d connector with self fixing mechanism.

The S150C is compatible with all new Thorlabs display units. A non-volatile memory in the sensor connector contains sensor information data and the NIST and PTB traceable calibration data.

Available Accessories

PM20-SC	SC fiber adapter
PM20-LC	LC fiber adapter
PM20-ST	ST fiber adapter
PM20-FC	FC fiber adapter (included)
PM20-SMA	SMA fiber adapter (included)

Cleaning and Maintenance

There are no serviceable parts in the S150C head. The housing may be cleaned by wiping with a soft damp cloth. When cleaning the aperture filter, treat it as any other fine optic. Gently blow off any debris using compressed air and wipe gently with an optic tissue wetted with propanol. If you suspect a problem with your S150C please call Thorlabs and an engineer will be happy to assist you.

As long as the sensor has not been exposed to excessive optical power (please pay attention to the maximum ratings in the technical specifications), the calibration should be very stable over long periods of time (well over a year). To keep the accuracy and performance of the S150C, Thorlabs recommends a yearly recalibration, starting one year after purchase.

Specifications

Detector Type	Silicon Photodiode
Wavelength Range	350 - 1100 nm
Optical Power Working Range	100 pW - 5 mW (-70 dBm ... +7 dBm)
Max Average Power Density	100 mW/cm ²
Max Pulse Energy	20 μJ
Linearity	± 0.5%
Resolution ¹⁾	10 pW (-80 dBm)
Measurement Uncertainty ²⁾	±3% 440 - 980 nm ±5% 350 - 439 nm, ±7% 981 - 1100 nm
Typical Application	Low Power Fiber Lasers
Laser Types	Fiber coupled Diode, He-Cd, Arlo, Krlo, Dye, Ti-Sapphire
Coating /Diffuser	N/A
Cooling	Convection
Head Temperature Measurement ³⁾	NTC Thermistor 3kΩ
Console Compatibility	PM100D, PM100A, PM100USB, PM200, PM320E
Response Time	< 1 μs
Sensor Dimensions	36.2 x 31 x 14.5 mm (w/o fiber adapter)
Active Detector Area	3.6 mm x 3.6 mm
Input Aperture	Ø5 mm
Connector	Sub-D 9p male
Weight	0.03 kg
Aperture Thread	SM05, outer thread
Fiber Adapters (optional)	SC, LC, ST (FC, SMA included)

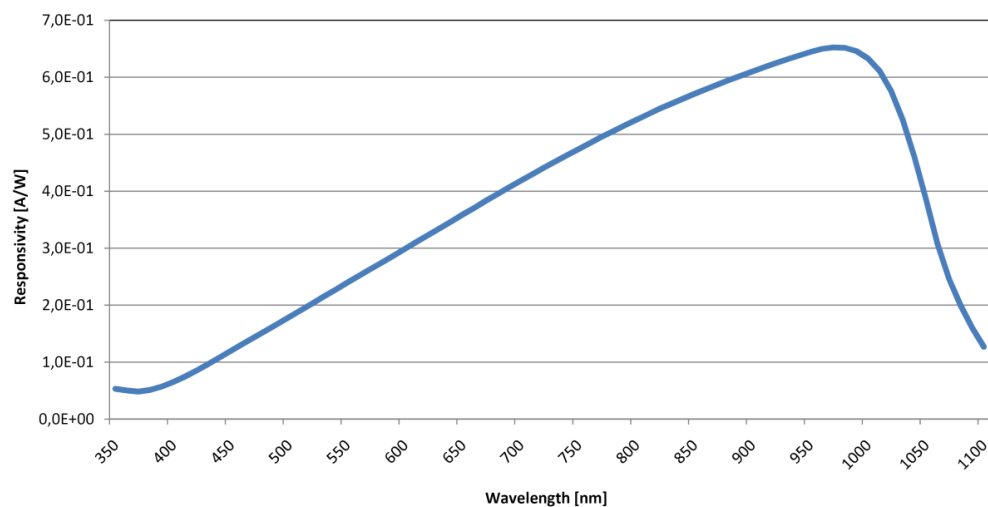
¹⁾ Measured with PM100D console in bandwidth low setting.

²⁾ Beam diameter > 1mm

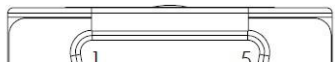
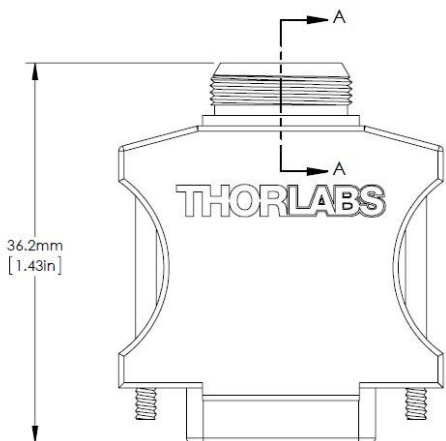
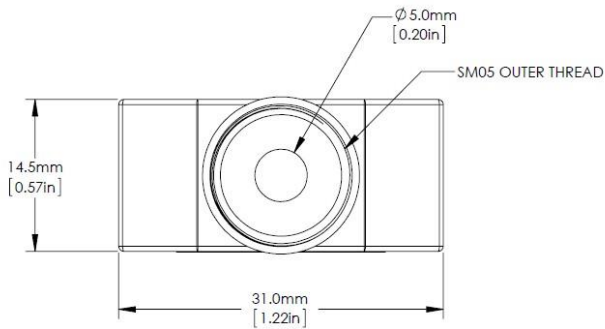
³⁾ This specification is valid for S150C devices from serial number 1203xxx. For older versions, please contact technical support.

Please note that the S150C power meter head is not compatible with the older Thorlabs power meter consoles (PM100, PM30, PM300, PM300E, S100).

Typical Response Graph



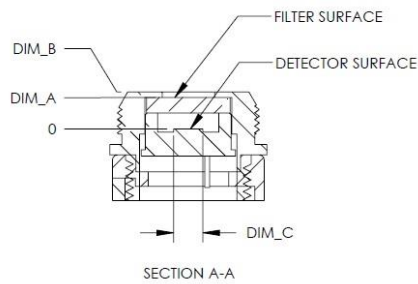
Drawings



INTERCHANGEABLE FIBER ADAPTER WITH SM05 THREAD (FC INCLUDED)



SELF FIXING MECHANISM SLIGHTLY PRESS FROM BOTH SIDES FOR PLUGGING AND UNPLUGGING



	DIM_A	DIM_B	DIM_C
S150C	2.0 mm	2.5 mm	3.6 mm
S151C	3.4 mm	2.9 mm	3.6 mm
S154C	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
S155C	2.7 mm	3.2 mm	2.0 mm

CONNECTOR PIN DIAGRAM

2	EEPROM DATA
3	PD ANODE & NTC GROUND
4	PD KATHODE
6	EEPROM GROUND
7	NTC
1,4,5,9	N.C.

Precautions and Warranty Information

These products are ESD (electro static discharge) sensitive and as a result are not covered under warranty. In order to ensure the proper functioning of a photodiode care must be given to maintain the highest standards of compliance to the maximum electrical specifications when handling such devices. The photodiodes are particularly sensitive to any value that exceeds the absolute maximum ratings of the product. Any applied voltage in excess of the maximum specification will cause damage and possible complete failure to the product. The user must use handling procedures that prevent any electro static discharges or other voltage surges when handling or using these devices.

Thorlabs, Inc. Life Support and Military Use Application Policy is stated below:

THORLABS' PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR IN ANY MILITARY APPLICATION WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF THORLABS, INC. As used herein:

- 1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.*
- 2. A critical component is any component in a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system or to affect its safety or effectiveness.*
- 3. The Thorlabs products described in this document are not intended nor warranted for usage in Military Applications.*





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 Ω
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 Ω 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)

Typical Temperature Response Times

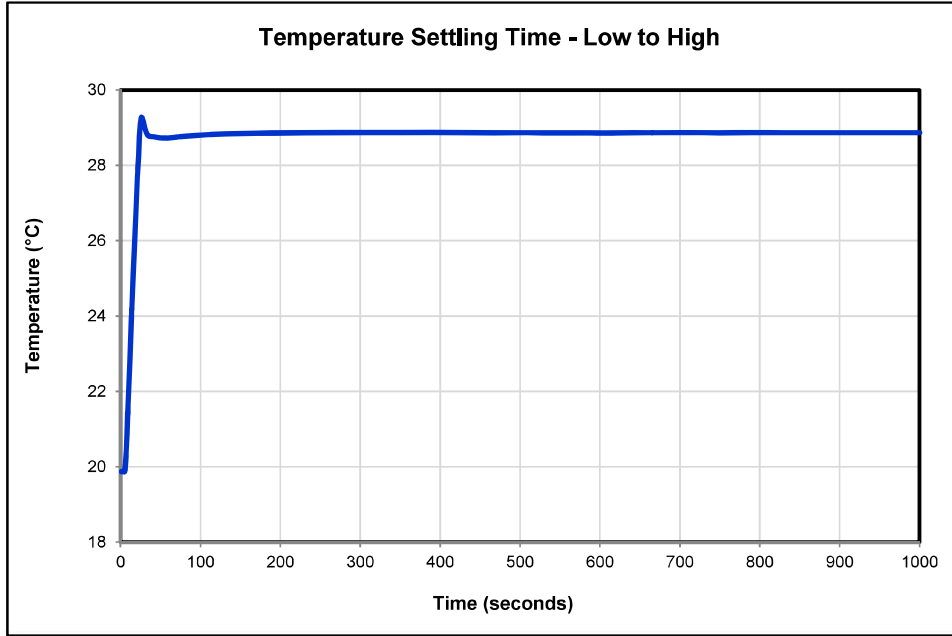


Figure 8 **Typical Heating Response**

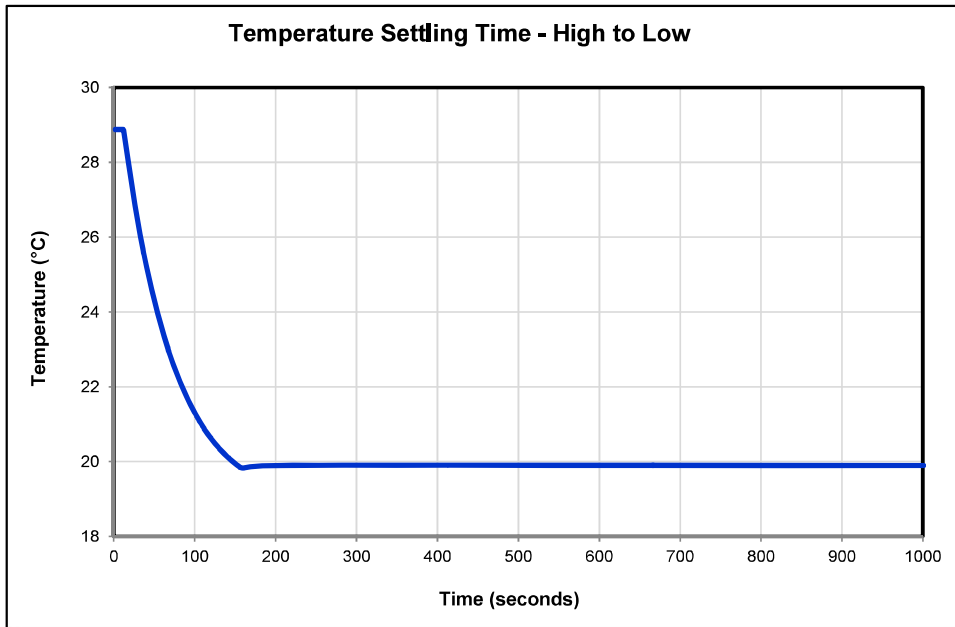


Figure 9 **Typical Cooling Response**

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).

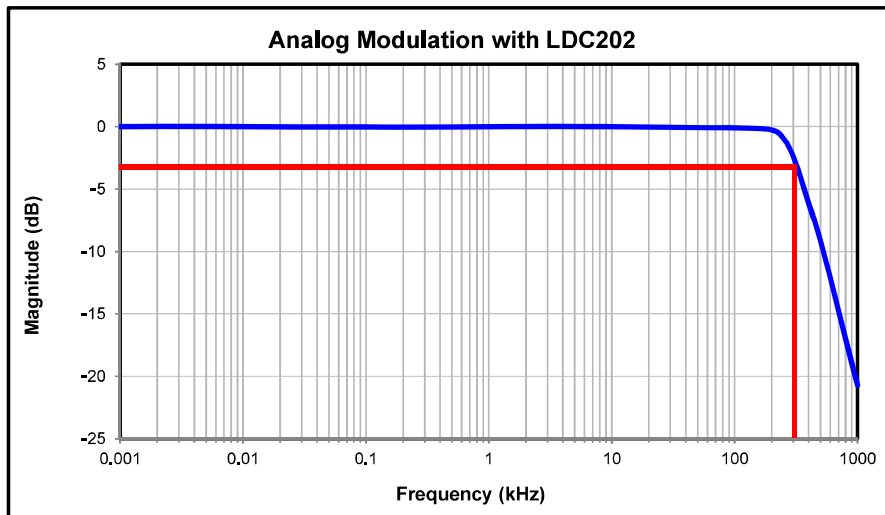


Figure 10 *Low Frequency Modulation Through LD Controller*

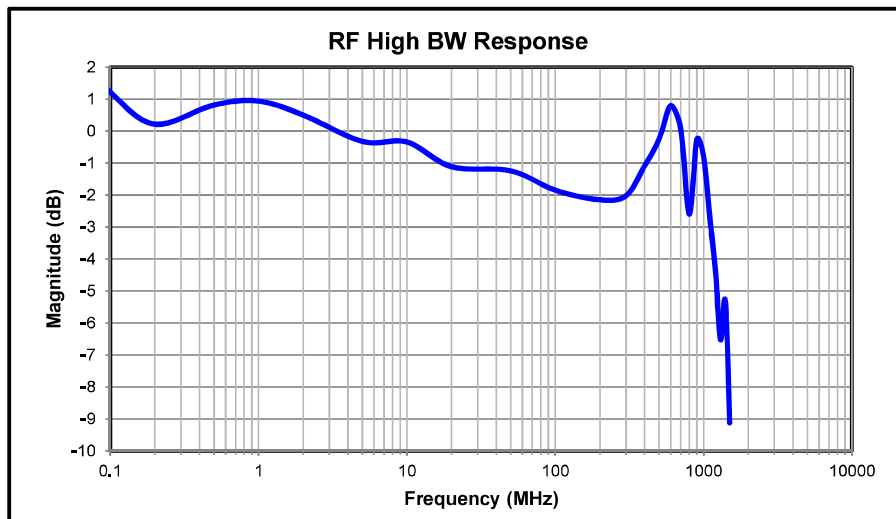


Figure 11 *RF Modulation Through SMA Connector on LM9LP*

Operation Manual
Thorlabs Blueline™ Series
Laser Diode Controller
LDC2xx



2004

1.5 Technical data

1.5.1 Common Data

(All technical data are valid at 23 ± 5°C and 45 ±15% humidity)

Connectors:

Laser diode, photodiode, LD ON signal, interlock (0 ... 5 V) LD OUTPUT	9-pin D-Sub-jack
Modulation input (-10 V ... +10 V) MOD IN	BNC
Control output (0 ... 10 V) CTL OUT	BNC
Chassis ground	4 mm banana jack
Mains input	IEC 320

General data:

Line voltage	100 V / 115 V / 230 V (-10%, +15 %) (fixed)
Line frequency	50 ... 60 Hz
Power consumption (max.):	
	LDC200VCSEL 20VA
	LDC201ULN 20 VA
	LDC202 25 VA
	LDC205 30 VA
	LDC210 40 VA
	LDC220 60 VA

Supply mains overvoltage	Category II (Cat II)
Operating temperature ¹⁾	0 ... +40 °C
Storage temperature	-40°C ... +70 °C
Relative Humidity	Max. 80% up to 31 °C, decreasing to 50% at 40 °C
Pollution Degree (indoor use only)	2
Operation altitude	< 3000 m
Warm-up time for rated accuracy	10 min
Weight	≤ 3 kg
Dimensions W x H x D	147 x 73 x 317 mm ³

¹⁾ non condensing

1.5.2 Individual data LDC200VCSEL

Constant current mode:

Control range (continuously variable)	0 ... ± 20 mA
Setting accuracy	± 0.05 mA
Resolution	1 μ A
Accuracy	± 20 μ A
Compliance voltage	> 6 V
Noise (10 Hz ... 10 MHz, typ.)	$\ll 1.5$ μ A
Ripple (50 Hz, rms, typ.)	$\ll 1.5$ μ A
Transients (typ.)	< 20 μ A
Short-time fluctuations (15 s, 0 ... 10 Hz, typ.)	< 5 μ A
Temperature coefficient	≤ 50 ppm/ $^{\circ}$ C
Drift (30 min, 0 ... 10 Hz, typ.)	≤ 2 μ A

Constant power mode:

Control range photodiode current	5 μ A ... 2 mA
Setting accuracy	± 2 μ A
Resolution photodiode current	0.1 μ A
Resolution optical power	1 μ W

Laser current limit:

Setting range	0 ... > 20 mA
Setting accuracy	± 0.05 mA
Resolution	1 μ A

Analog modulation/voltage control:

Input resistance	10 k Ω
3dB-bandwidth (constant current)	DC ... 250 kHz
Modulation coefficient (CC)	2 mA/V $\pm 5\%$
Modulation coefficient (CP)	0.2 mA/V $\pm 5\%$

Control output (I_{LD}):

Load resistance	≥ 10 k Ω
Transfer coefficient	500 V/A $\pm 5\%$



OZ OPTICS LTD.

219 Westbrook Rd.
 Ottawa, Ontario, Canada, K0A 1L0
Tel: 613-831-0981 **Toll Free:** 1-800-361-5415 **Fax:** 613-836-5089
Email: sales@ozoptics.com **Website:** www.ozoptics.com

CERTIFICATE OF COMPLIANCE
Fiber Optic Attenuator

Customer: University of Zaragoza

Work Order: 202688

PO#: Q99786

Part #: BB-100-11-650-980/1000-M-25-XX-2.2-1

TEST CONDITIONS

	Wavelength(nm)	Input Fiber Size (µm)	Output Fiber Size (µm)
Setup 1	532	980/1000	980/1000
Setup 2			

RESULTS

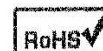
Attenuator Serial Number	Insertion Loss (dB)	SET UP #1		SET UP #2		50 cm Drop Test (±dB change at 20dB attenuation)
		Attenuation Range (dB)	Back Reflection (dB)	Insertion Loss (dB)	Attenuation Range (dB)	
202688-01	2.80	IL to < -40	< -25			

NOTES

OZ Optics certifies that the above items have been assembled and tested at OZ Optics Ltd., and are in full compliance of all quoted specifications, drawings, and correspondence. Test results and other documentation of quality are kept at OZ Optics Ltd., and are available for review by the customer.

Test Engineer: Suzana Uzicanin

Date: 29 Aug 2016



**OPERATING INSTRUCTIONS FOR PIGTAIL STYLE VARIABLE
ATTENUATORS USING THE BLOCKING TECHNIQUE:**

The Attenuator is prealigned for optimum coupling efficiency in the factory. Remove the optional sealing cap to obtain access to the radial blocking screw. Rotate the radial screw clockwise to block the collimated beam between the two plates. Use the screwdriver provided to rotate the screw. Put the sealing cap back on the blocking screw. Tighten it until you feel firm resistance from the sealing gasket. **Do not over tighten.** The attenuator is bidirectional, but for optimum conditions use the end with the mounting holes as the input side.

IMPORTANT: DO NOT ADJUST OTHER SCREWS.

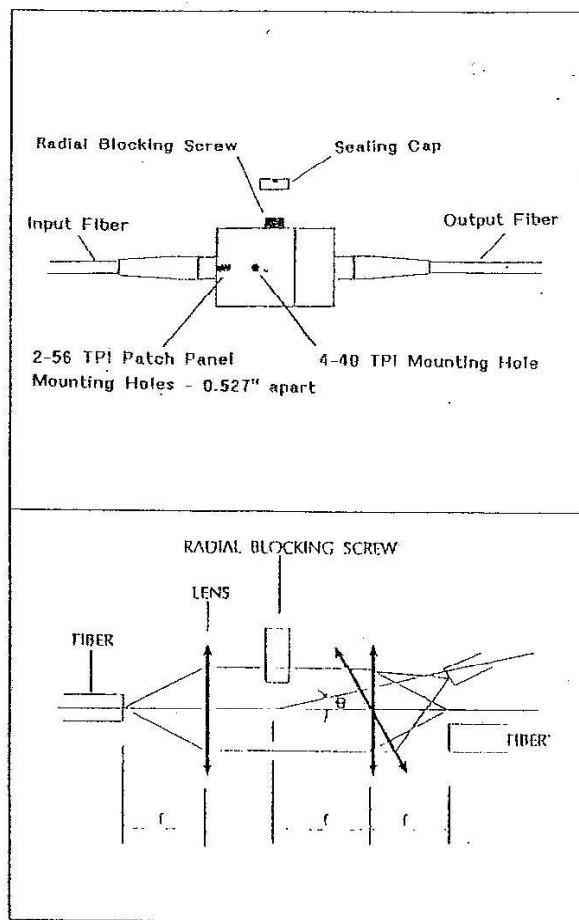


Figure 1. Operating principle of a variable attenuators using the blocking technique.

41N

Anexo VIII

Repercusión

En este anexo se muestran los siguientes artículos:

- Caracterización de una fibra óptica de plástico de salto de índice (SI-POF) de baja apertura numérica con luz de 520 nm.
- Experimental assesment of the transmission performance of SI-POFs using a green laser diode.

Caracterización de una fibra óptica de plástico de salto de índice (SI-POF) de baja apertura numérica con luz de 520 nm

Characterization of a low numerical aperture SI-POF at 520nm

María MAZO ⁽¹⁾, M. Ángeles LOSADA ^(1,2), Candela MUZÁS ⁽¹⁾, Alicia LÓPEZ ^(1,2), Javier MATEO ^(1,2)

1. Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA), Universidad de Zaragoza, María de Luna, 1, E-50018 Zaragoza
2. Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF), Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, Mariano Esquilor Gómex s/n, E-50018 Zaragoza

Persona de contacto: María Mazo (704871@unizar.es).

RESUMEN:

El objetivo de este estudio es realizar una caracterización experimental completa de las propiedades de transmisión de la fibra óptica de plástico de salto de índice (SI-POF) de baja apertura numérica utilizando luz de 520 nm (verde). Manteniendo invariables las condiciones de inyección, se han obtenido la potencia óptica transmitida, el patrón de campo lejano (FFP, Far-Field-Pattern) y la respuesta frecuencial en función de la longitud de la fibra. Además, se ha medido la tasa de error binario (BER, Bit-Error-Rate) para verificar las prestaciones de la fibra como parte de un sistema completo. Estas medidas servirán para elaborar un modelo para este tipo de fibra y determinar sus posibles escenarios de aplicación.

Palabras clave: fibras ópticas de plástico, salto de índice, baja apertura numérica, 520 nm, ancho de banda, caracterización experimental, comunicaciones ópticas

ABSTRACT:

In this work, we carry out an experimental characterization of the transmission properties of low numerical aperture step-index optical plastic fibers (SI-POF) using light of 520 nm. Maintaining injection conditions unchanged received power, Far Field Pattern (FFP) and frequency response are measured as a function of the fiber length. Measurements of Bit-Error-Rate (BER) allow to assess fiber capabilities as part of a communication system. These measurements will be used to devise a model for this fiber type, as well as to determine better suited scenarios for its application.

Key words: plastic optical fibers, step-index, low numerical aperture, 520 nm, bandwidth, experimental characterization, optical communications

1.- Introducción

Las fibras ópticas de plástico (POFs) son utilizadas habitualmente en redes de comunicaciones de corto alcance situadas tanto en el hogar como en medios de transporte. Se han convertido en un medio de transmisión competitivo en estos entornos debido al bajo coste de la fibra [1][2]. Su aplicación en automóviles resulta rentable ya que, el uso de la POF, además de abaratar costes de instalación y

mantenimiento, permite la transmisión de datos a baja velocidad y facilita la implementación debido a su alta resistencia a curvaturas, vibraciones, etc. [3]. El éxito de las redes domésticas basadas en POF y la creciente necesidad de automatización de estos entornos, ha motivado la posibilidad de introducir estas fibras también en aeronaves [4][5]. Sin embargo, a la hora de transmitir datos multimedia, las POFs convencionales presentan algunas limitaciones en su ancho de banda.

Las dos propiedades principales que limitan las prestaciones de la fibra óptica de plástico como medio de transmisión son la dispersión y la atenuación. Los dos mínimos de la atenuación en fibras de polimetil-metacrilato (PMMA), se encuentran, uno alrededor de los 520-570 nm (verde) y otro en 650 nm (rojo), con unos valores en torno a los 150-200 dB/km. Aunque el valor de la atenuación es menor en 570 nm que en 650 nm, la mayor parte de los sistemas con POFs operan con luz roja debido a la mayor disponibilidad de fuentes que emiten en esta región del espectro. De hecho, en las hojas de características solo figuran valores para 630-670 nm y la mayor parte de las medidas de caracterización publicadas se han realizado utilizando luz en este rango. Por ello, en este trabajo vamos a utilizar como fuente un láser que emite en 520 nm.

Las fibras de PMMA con núcleo de 1 mm de diámetro propagan millones de modos, de forma que su elevada dispersión modal limita fuertemente su capacidad de transmisión. Como alternativa a las fibras de salto de índice (SI-POF), se fabrican fibras de PMMA de índice gradual (GI-POF) que presentan un ancho de banda mucho mayor, aunque una atenuación más alta [6]. Como compromiso entre ambas, la mayoría de los fabricantes ofrecen fibras de plástico de baja apertura numérica (low NA POF) que, en realidad son fibras con un doble recubrimiento. El recubrimiento intermedio tiene el efecto de atenuar fuertemente los modos de orden alto después de unos 50 metros de propagación. Este efecto implica una mejora del ancho de banda respecto de las fibras convencionales alcanzando valores superiores a los 100MHz en 100m [1].

Así, se va a caracterizar una SI-POF de PMMA con núcleo de 1 mm de diámetro y baja apertura numérica, utilizando luz verde. Para ello, se ha diseñado un protocolo experimental basado en el método de corte para obtener la potencia recibida, la respuesta en frecuencia, la distribución angular de intensidad y la tasa de error binario (BER) en función de la longitud de la fibra, manteniendo invariables las condiciones de inyección.

La organización del documento es la siguiente. En primer lugar, se describen la configuración experimental y el protocolo de

medida. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para todas las longitudes de fibra analizadas, partiendo de un carrete de 130 metros, así como los parámetros obtenidos: ancho de banda, EAF (Encircled Angular Flux) [7], atenuación y tasa de bit para un error fijo, todos ellos representados en función de la longitud de la fibra. Finalmente, los resultados obtenidos se contrastarán con los de otras fibras de PMMA para evaluar las ventajas que supone su menor apertura.

2.- Procedimientos experimentales

La fibra sobre la que se va a realizar el experimento es la MH4001 [8] con núcleo de PMMA, de 1 mm de diámetro y perfil de salto de índice fabricada por la compañía Mitsubishi Rayon CO. LTD, cuya apertura numérica es de 0.3.

Para analizar las propiedades de la SI-POF en función de la longitud de la fibra, aplicamos un protocolo experimental basado en el método de corte, partiendo de un carrete de 130 metros y cortando hasta la menor longitud que es posible medir. A lo largo del experimento, las longitudes, en metros, sobre las que se realizaron las medidas fueron: 130, 110, 100, 85, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10 y 3. Antes de comenzar el experimento se llevó a cabo la preparación del extremo interno del carrete (corte, pelado y pulido) y su inserción en un conector ST que, posteriormente, fue conectado y fijado a la fuente óptica de manera que permaneció inalterado durante la realización del experimento completo, con el objetivo de que las condiciones de inyección permanecieran inalteradas, ya que la SI-POF es muy sensible a los cambios en la inyección y sus propiedades de transmisión podrían verse afectadas [9].

Para cada longitud analizada se obtuvieron varias medidas de: potencia óptica, S_{21} , FFP y BER en función de la tasa de transmisión. Una vez realizadas todas las medidas, se cortó un segmento del extremo externo de la fibra y se realizaron las medidas para la siguiente longitud.

En la Fig. 1 se muestra un diagrama de la configuración experimental utilizada para llevar a cabo el experimento de corte. En el esquema aparecen diferenciados los bloques con los

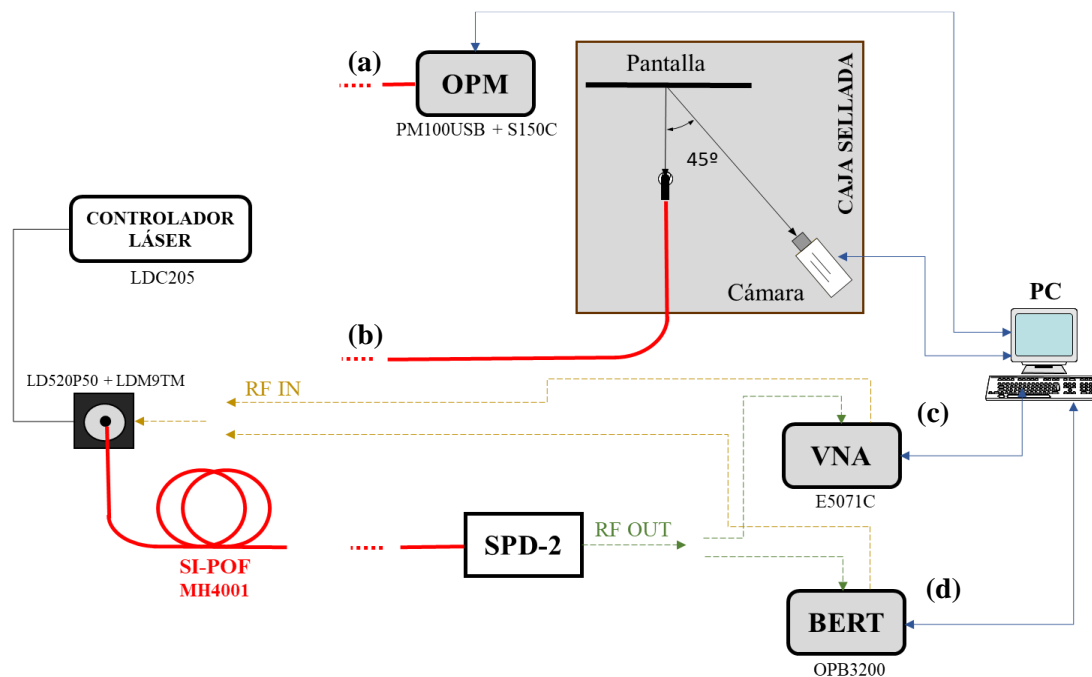


Fig. 1: Montaje experimental con los diferentes dispositivos para obtener: potencia óptica recibida (a), imágenes de patrón de campo lejano (b), parámetro de transmisión S_{21} (c) y BER (d).

que se ha obtenido cada medida. Se ha seleccionado como fuente de emisión óptica el diodo láser LD520P50 de Thorlabs, cuya longitud de onda de emisión es 520 nm (verde) y coincide con uno de los mínimos absolutos de la atenuación en fibras con núcleo de PMMA y su potencia nominal de salida es de 50 mW. La corriente de polarización se fijó en 80mA con el controlador láser LDC205 de Thorlabs conectado a la base LDM9TM, para modular y estabilizar su temperatura en 25°C. El receptor utilizado fue el receptor SPD-2 (650 nm) de Graviton, con un ancho de banda nominal de 1.2 GHz y al que se conectó la fibra mediante un conector ST. Para medir la potencia óptica recibida, se utilizó el medidor de potencia PM100USB con el sensor S150C, ambos de Thorlabs (Fig. 1 (a)). Para obtener el parámetro de transmisión S_{21} se utilizó el montaje de la Fig. 1 (b), que consiste en conectar la salida de RF del Analizador de Redes Vectoriales (VNA E5071C Agilent) para modular el láser y la salida de RF del detector SPD-2 al VNA. Para medir el BER se utilizó el OptoBERT (OPB3200), que incorpora un generador de patrones pseudoaleatorios NRZ (PRBS-23) y un analizador de errores. La salida y la entrada de RF del OptoBERT se conectaron, respectivamente, al láser y al

receptor (Fig. 1 (c)). Para tomar las medidas de patrón de campo lejano se colocó la fibra a una distancia de 7.5 cm de una pantalla en blanco y se grabaron 15 imágenes utilizando una cámara (QICAM FAST 1394CCD) [10] (Fig. 1 (d)).

3.- Resultados

Las medidas obtenidas para todas las longitudes de fibra analizadas han sido: potencia recibida, respuesta en frecuencia, EAF y BER.

En la Fig. 2 se muestran la media y la desviación estándar de la potencia óptica recibida, en dBm, en función de la longitud de la fibra, junto al ajuste lineal de los datos.

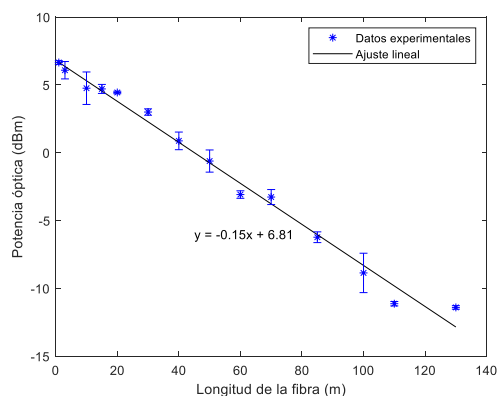


Fig. 2: potencia recibida vs longitud de fibra.

La pendiente de esta recta, cuyo valor es de 0.15 dB/m, representa la atenuación total del carrete de fibra para 520 nm de longitud de onda. Este valor es algo menor que la atenuación para SI-POF en 650 nm, que está normalmente en torno a 0.18 dB/m.

En la Fig. 3 (a) se muestran las respuestas en frecuencia promedio de 5 medidas junto a su desviación estándar. Estas respuestas se obtienen como la mitad de la diferencia entre el parámetro S_{21} medido para la fibra y el S_{21} de referencia (medido con un rabillo de 1 m) [6]. Para longitudes menores de 10 m no se ha podido obtener el parámetro S_{21} debido a la saturación del detector. Se ve que la respuesta en frecuencia se degrada conforme aumenta la longitud de la fibra. En la Fig. 3 (b) se muestra el ancho de banda a 3 dB, extraído a partir de las respuestas en frecuencia de la Fig. 3 (a). Para longitudes menores de 15 metros no se ha podido determinar con precisión porque la respuesta en frecuencia no disminuye lo suficiente por debajo del nivel de ruido tolerable.

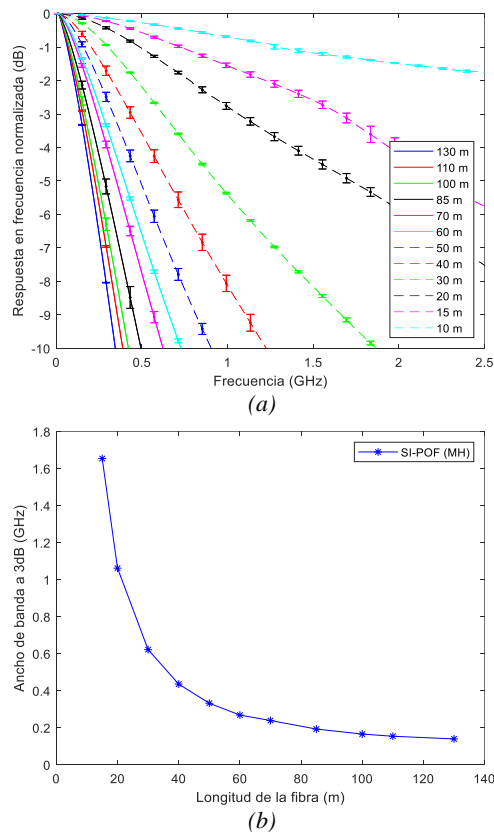


Fig. 3: respuesta en frecuencia (a) y ancho de banda a 3 dB (b) para todas las longitudes de fibra.

El ancho de banda disminuye de forma pronunciada con la longitud hasta los 50 metros, cuya variación a partir de este momento es muy lenta. Para una longitud de fibra de 100 metros el ancho de banda es, aproximadamente, 165 MHz, superior al obtenido con POFs estándar con mayores aperturas numéricas (0.5) cuyo ancho de banda en esta longitud apenas alcanza los 100 MHz.

En la Fig. 4 (a) se muestran las EAF para cada longitud, extraídas de las FFPs obtenidas en el experimento. La EAF en función del ángulo nos da la proporción de potencia contenida en un cono de ese ángulo respecto de la potencia total y nos permiten comparar, independientemente de la potencia recibida, la forma de la distribución angular [7]. De esta forma, se puede calcular la apertura numérica de salida de la fibra (valor de la EAF a 0.99) y si se conocen las características de diseño del receptor, obtener la potencia óptica que recibe su zona activa. Las EAF se ensanchan conforme aumenta la longitud hasta llegar a 20 metros.

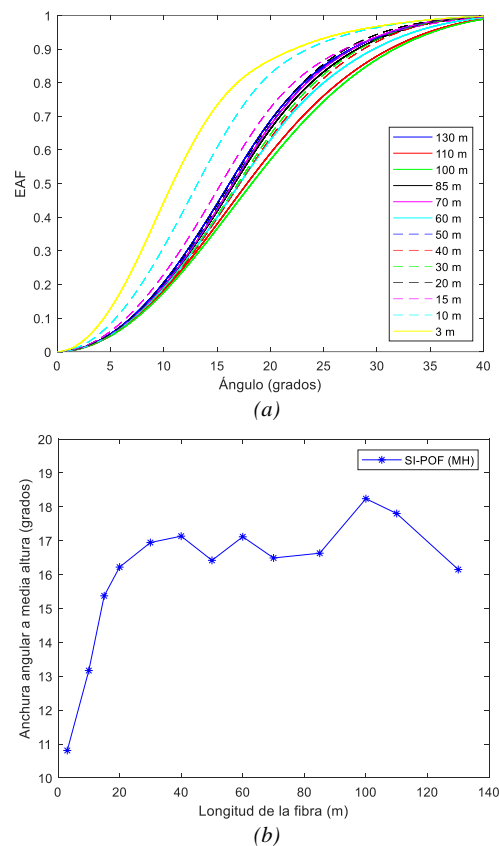


Fig. 4: EAF (a) y anchura angular a media altura (b) para todas las longitudes de fibra.

A partir de esta longitud tienen formas y anchuras similares con una cierta variabilidad que podría atribuirse a las diferentes terminaciones del extremo de salida de la fibra, que cambiaba en cada serie de medidas. En la Fig. 4 (b) se muestra la anchura angular cuando el valor de la EAF es 0.5 en función de la longitud de la fibra. A partir de los 20 metros el ancho a media altura se mantiene más o menos estable, con un valor medio de 17 grados.

Finalmente, en la Fig. 5 se muestran las curvas de BER en función de la tasa de bit en Mb/s. Se muestra también la curva de referencia del sistema (back-to-back), medida con una fibra muy corta (1m) conectada directamente al láser y al receptor. La curva de referencia es similar al BER medido para una longitud de 10 metros de fibra, lo cual indica que, hasta esta longitud, la fibra no introduce degradación en el sistema. Se observa que para 130 y 110 metros el error estaba por encima de 10^{-3} para todas las tasas de bit probadas. En 100 metros el BER se mantiene por debajo de 10^{-6} hasta los 400 Mb/s. A partir de 100 metros, al disminuir la atenuación y la dispersión modal, las curvas de BER se desplazan hacia la derecha, lo que indica una mejora en el rendimiento del sistema, transmitiendo tasas superiores a 1.5 Gb/s con un BER por debajo de 10^{-6} de 10 a 30 metros. Para las longitudes más cortas no se ha podido obtener la tasa de error debido a la saturación del detector.

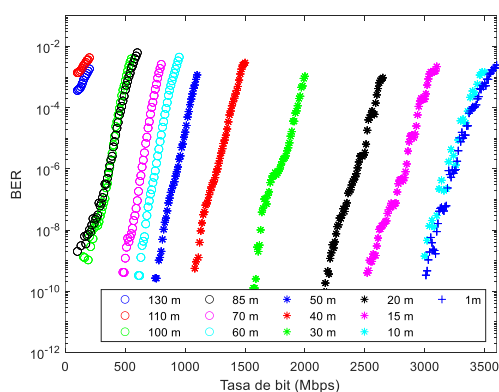


Fig. 5: BER vs tasa de bit para todas las longitudes de fibra.

4.- Conclusiones

En este artículo se han determinado experimentalmente las propiedades de transmisión de una SI-POF de PMMA de baja apertura

numérica en función de la longitud de la fibra para una longitud de onda de 520 nm. La metodología seguida en la obtención de estos datos, manteniendo la inyección fija y estable a lo largo del experimento y midiendo en distintas longitudes, permitirá utilizar las medidas de EAF y de respuesta en frecuencia para ajustar los parámetros de las funciones características del modelo matricial para fibras de plástico integrado en entornos de simulación [11].

La menor apertura numérica de la fibra MH4001 se traduce en un mayor ancho de banda que las SI-POF estándar. Se han obtenido anchos de banda mayores de 1 GHz para fibras menores de 30 metros. Para 100 metros de longitud el ancho de banda obtenido es superior a 150 MHz.

Los resultados muestran que la atenuación en torno al verde (0.15 dB/m) es menor que en el rojo de acuerdo con las curvas de atenuación espectral para el PMMA. De esta manera, cuando se trabaja con esta longitud de onda las potencias recibidas son suficientes para conseguir una buena transmisión. Por ello, es capaz de transmitir, incluso con 130 metros de fibra, aunque a tasas de error elevadas. De hecho, se puede transmitir a una tasa de 1.25 Gb/s con una tasa de error de 10^{-6} para una distancia de enlace de 40 metros. Con esta misma tasa de error, se puede llegar a transmitir hasta 400 Mb/s en 100 metros. La incorporación en el receptor de un sistema de corrección de errores (FEC, Forward-Error-Correction) y la aplicación de formatos con un mejor aprovechamiento del espectro pueden aumentar aún más estos valores [12].

En conclusión, las POFs de baja apertura permiten la transmisión de tasas superiores a Fast-Ethernet en 100 metros, por lo que son idóneas para entornos industriales. Además, pueden alcanzar Gigabit Ethernet (1.25 Gb/s) en distancias de enlace adecuadas para su aplicación en entornos domésticos y oficinas.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto MICINN/FEDER con referencia RTI2018-094669-B-C33, por el Gobierno de Aragón (DGA) con el proyecto T20-20R, por Altran Innovación S.L.U. a través del proyecto OTRI-2019/0626 y por la cátedra Mobility City - Universidad de Zaragoza.

Referencias

- [1] Olaf ZIEMANN, Jürgen KRAUSER, Peter E. ZAMZOW, Werner DAUM, “*POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*” (Springer, 2008).
- [2] Peter KRÖPLIN, Carsten DIEHLING, Markus BECKERS, Viktoria SCHRANK, M. Simon BEER, Thomas GRIES, Gunnar H. SEIDE, Christian-Alexander BUNGE, “*Overview of the POF market*”, *Polymer Optical Fibres: Fibre Types, Materials, Fabrication, Characterization and Applications*, pp. 349-400, 2017.
- [3] Andreas GRZEMBA, “*MOST: The Automotive Multimedia Network*” (Franziss Verlag, 2011).
- [4] M. Ángeles LOSADA, Javier MATEO, “*Short Range (In-Building) Systems and Networks: A Chance for Plastic Optical Fibers*”, *WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering*, N. Antoniadis, G. Ellinas, I. Roudas, Series: Optical Networks (B. Mukherjee) (Springer, 2012).
- [5] Dwight RICHARDS, M. Ángeles LOSADA, Neo ANTONIADES, Alicia LÓPEZ, Javier MATEO, Xin JIANG y Nicholas MADAMOPOULOS, “*Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System*”, *J. Light. Technol.*, vol. 31, pp. 468-475, 2013.
- [6] Alicia LÓPEZ, Nuria VILLAR, M. Ángeles LOSADA, Estela LAPORTA, Javier MATEO, “*Experimental Characterization of the Transmission Properties of Large-Core Graded-Index PMMA Fibers*”, *Proceedings of the 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, IEEE, 2020.
- [7] Manabu KAGAMI, Akari KAWASAKI, Masatoshi YONEMURA, Makoto NAKAI, Pablo V. MENA y David R. SELVIAH, “*Encircled Angular Flux Representation of the Modal Power Distribution and Its Behavior in a Step-Index Multimode Fiber*”, *J. Light. Technol.*, vol. 34, no 3, pp. 943-951, 2016.
- [8] Mitsubishi Chemical. Eska. Polymer Optical Fiber, <https://www.pofeska.com/>
- [9] Alicia LÓPEZ, M. Ángeles LOSADA, Javier MATEO y Joseba ZUBIA, “*On the Variability of Launching and Detection in POF Transmission Systems*”, *Proceedings of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, IEEE, 2019.
- [10] Javier MATEO, M. Ángeles LOSADA, Z. Ignacio GARCÉS, “*Global characterization of optical power propagation in step-index Plastic Optical Fibers*”, *Opt. Express*, vol. 14, pp. 9028-9035, 2006.
- [11] Dwight RICHARDS, Alicia LÓPEZ, M. Ángeles LOSADA, Pablo V. MENA, Enrico GHILLINO, Javier MATEO, Neo ANTONIADES y Xin JIANG, “*Overcoming Challenges in Large-Core SI-POF-Based-System-Level Modeling and Simulation*”, *Photonics*, vol. 6, pp. 88, 2019.
- [12] Guillermo RAMOS, José A. ALTABÁS, David IZQUIERDO, Alicia LÓPEZ, M. Ángeles LOSADA, Jesús CLEMENTE, Samael SARMIENTO, Javier MATEO, José A. LÁZARO y Z. Ignacio GARCÉS, “*Bit and Power Loaded Multiband Carrierless Amplitude Phase Modulation for High Capacity POF Links*”, *En Actas de la XI Reunión Española de Optoelectrónica (OPTOEL)*, SP3.COM04, Zaragoza, 2019.

Caracterización de una fibra óptica de plástico de salto de índice (SI-POF) de baja apertura numérica con luz de 520 nm

María MAZO ⁽¹⁾, M. Ángeles LOSADA ^(1,2), Candela MUZÁS ⁽¹⁾, Alicia LÓPEZ ^(1,2), Javier MATEO ^(1,2)

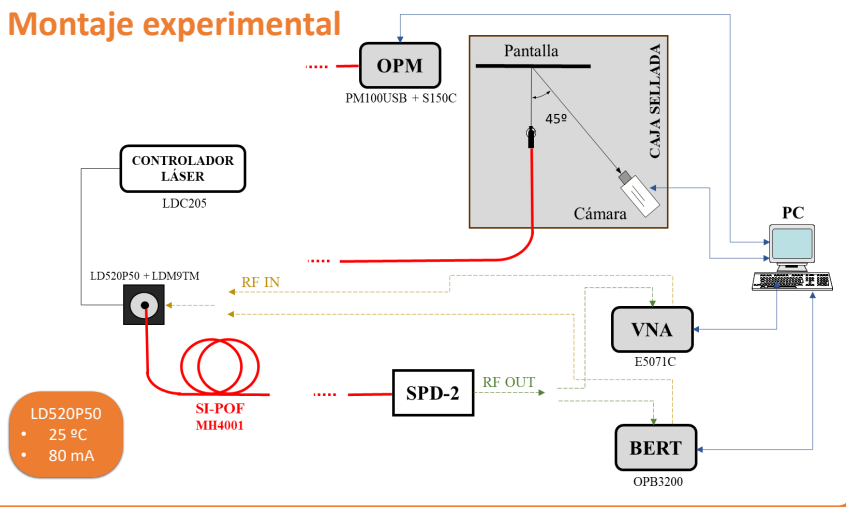


1. Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA), Universidad de Zaragoza
 2. Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF), Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza
 Contacto: 704871@unizar.es



El objetivo de este estudio es realizar una caracterización experimental completa de las propiedades de transmisión de la fibra óptica de plástico de salto de índice (SI-POF) de baja apertura numérica utilizando luz de 520 nm (verde). Manteniendo invariables las condiciones de inyección, se han obtenido la potencia óptica transmitida, el patrón de campo lejano (FFP, Far-Field-Pattern) y la respuesta frecuencial en función de la longitud de la fibra. Además, se ha medido la tasa de error binario (BER, Bit-Error-Rate) para verificar las prestaciones de la fibra como parte de un sistema completo.

Montaje experimental



Procedimiento de medida

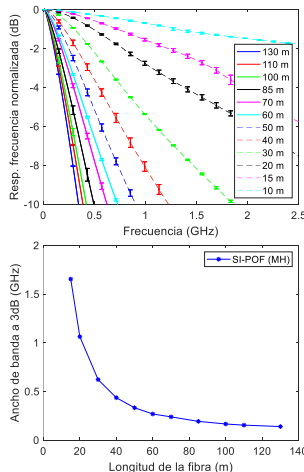
- Condiciones de inyección invariables
- Método de corte con longitudes (metros): 130, 110, 100, 85, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10 y 3
- Potencia óptica → Atenuación
- S₂₁ → Respuesta en frecuencia → Ancho de banda a -3dB
- FFP → EAF → Ancho de EAF a 50% y 99%
- BER vs. Tasa de transmisión

POF caracterizada

- MH4001 fabricada por Mitsubishi Rayon CO. LTD
- PMMA con núcleo de 1 mm de diámetro
- Perfil de salto de índice → SI-POF
- Baja apertura numérica → NA=0,3
- Doble cubierta

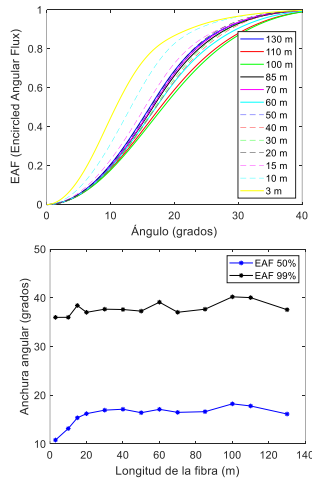
Resultados

Respuesta en frecuencia y ancho de banda a -3 dB



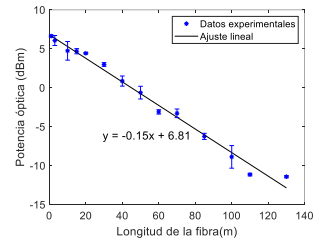
Ancho de banda en **100 m**: 165 MHz
 Ancho de banda en **10 m**: > 2.5 GHz

Proporción de potencia emitida dentro de un ángulo (EAF)



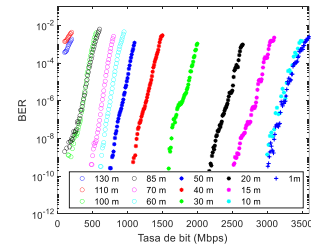
Anchura de EAF al **50%**: aprox. 17°
 Anchura de EAF al **99%**: aprox. 38°

Potencia y atenuación



Atenuación:
 0,15 dB/m

BER



Con BER < 10⁻⁶ :
 • **100 m**: 400 Mb/s
 • **40 m**: 1.25 Gb/s
 • **30 m**: > 1.5 Gb/s
 • **10 m**: la fibra no limita

Conclusiones

La menor apertura numérica de la fibra MH4001 se traduce en un mayor ancho de banda que las SI-POF estándar. La atenuación en torno al verde es menor que en el rojo de acuerdo con las curvas de atenuación espectral para el PMMA. La combinación de su mayor respuesta en frecuencia con la baja atenuación en el verde hace posible su aplicación en entornos industriales (Fast-Ethernet. 100 metros) y domésticos (Gigabit-Ethernet. 40 metros).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto MICINN/FEDER con referencia RTI2018-094669-B-C33, por el Gobierno de Aragón (DGA) con el Proyecto T20-20R, por Altran Innovación S.L.U a través del Proyecto OTRI-2019/0626 y por la Cátedra Mobility City - Universidad de Zaragoza.



Experimental assessment of the transmission performance of SI-POFs using a green laser diode

M. Ángeles Losada ^{1,2,*}, María Mazo ¹, Alicia López ^{1,2}, Candela Muzás ¹ and Javier Mateo ^{1,2}

¹ Electronics Engineering and Communications Department, EINA, University of Zaragoza, María de Luna, 1, E-50018 Zaragoza, Spain

² Photonics Technology Group (GTF), Aragón Institute of Engineering Research, University of Zaragoza, Mariano Esquillor Gómez s/n, E-50018 Zaragoza, Spain

* Correspondence: alosada@unizar.es

Abstract: Large-core Polymer Optical Fiber (POF) links have limitations in capacity and reach due to the fibers high modal dispersion and attenuation. Most of these links use red laser diodes even though the attenuation spectrum of Poly (methyl methacrylate) (PMMA), the basic polymer used to manufacture these fibers, has a lower minimum in the green region. Therefore, we set out to explore the potential use of green light in transmission systems comparing the performance of three SI-POFs with different numerical apertures. We obtained measurements of intensity distribution, frequency response and Bit-Error-Rate (BER), as a function of fiber length. We have also compared the fibers frequency responses with red and green light for a few selected lengths. Our results confirm that SI-POFs have lower attenuations for green light that can increase their application lengths. This advantage is partially counterbalanced by a slightly higher dispersion that limits the capacity of the high-aperture fibers, particularly at relatively short lengths. Our conclusions are critical to understand the fiber behavior and to design thorough SI-POF models that can aid the design of POF-based links in different scenarios.

Keywords: polymer optical fibers; step-index; SI-POF; green light; 520 nm; optical communications

Citation: Lastname, F.; Lastname, F.; Lastname, F. Title. *Polymers* **2021**, *13*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Accepted: date

Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Polymer Optical Fibers (POFs) are fibers whose core and cladding are made of plastic materials of which Poly(methyl methacrylate) (PMMA) and amorphous fluoropolymers are the most generalized [1,2]. POFs made of the later materials have core diameters from 50 to 250 μm , and their transmission performance can even surpass that of multimode glass optical fibers [3]. On the other hand, PMMA fibers have larger core diameters (typically 980 μm) and numerical apertures (NAs) up to 0.6. They can be manufactured with a single core (SC) or a number of smaller cores (multi-core, MC), that present different index profiles: step-index (SI), multi-step-index (MSI) or graded-index (GI) profiles [4]. In general, large-core PMMA POFs have narrower bandwidth and higher attenuation than glass fibers, but are still adequate to meet the demands of short-range networks in automotive, industrial, domestic and, more recently, avionics environments [5]. The automotive industry led the way introducing them as the transmission media in car data links [6], and more recently, they have also succeeded in domestic networks, usually combined with Wi-Fi [7]. Nowadays, the manufacturing of PMMA fibers with thermoset polymer jackets able to sustain temperatures up to 105 $^{\circ}\text{C}$, has raised the interest of the aeronautic industry in POFs [8].

Added to the advantages of all optical fibers (electromagnetic immunity and electric passiveness), POFs specific characteristics make them very attractive. They are lightweight, flexible and resistant to impacts. Moreover, PMMA fibers have minimum attenuation in the visible range of the spectrum (530, 570 and 650 nm), that facilitates failure

detection and avoids safety issues [2]. Their most attractive features, however, are their large cores and high numerical apertures that enable easy connections using simple termination tools. In consequence, POFs can be easily manipulated and do not require expert handling. This “do-it-yourself” feature is responsible for POF success in domestic applications [9], and the reduced cost of deployment and maintenance is a key factor for cost-effective applications [10–12]. On the other hand, POFs large sizes and high apertures allow transmission of millions of modes giving rise to high modal dispersion that decreases bandwidth and thus, limits POF systems capacity. In addition, PMMA has high diffusion coefficients that promote strong mode coupling with a negative impact in transmission properties [13].

Although the absolute minimum of PMMA spectral attenuation is near 530 nm, POF links are often based in laser diodes emitting in the red region of the visible spectrum because of the wider choice of commercially available devices. The use of sources at other wavelengths for data transmission was reviewed in [4]. Those transmitters were mainly based on green emitting LEDs that profited from the lower attenuation of POFs in this region to increase the reach of relatively low-capacity links. More recently, the application of spectrally efficient modulation formats has boosted system capacity that can be further increased with wavelength division multiplexing (WDM) schemes that transmit in green light among other wavelengths [14,15]. However, the manufacturers only include data for the red region of the spectrum in their fiber characteristics sheets, and measurements of basic transmission properties at other wavelengths are scarce.

In this context, we are going to characterize three large-core PMMA fibers of different numerical apertures using a laser diode emitting at 520 nm. Measurements of received power, intensity distribution, frequency response and Bit Error Rate (BER) for different fiber lengths provide a quantitative assessment of the potential of the different fibers when working near the green light attenuation minimum that is crucial to estimate accurately their applicability in different environments. Moreover, these measurements are indispensable to understand POF behavior in order to postulate realistic models.

The paper is organized as follows. The methodology is addressed in the first section, where the experimental protocols and the set-up that integrates several independent subsystems to obtain different measurements are outlined. In the next section, the experimental results are shown for all fiber types and fiber lengths. Transmission parameters extracted from the measurements: received power, spatial distribution width, frequency bandwidth, and bit rate for a fixed BER, are represented versus fiber length to compare the performance of the different fibers using green light. In addition, frequency responses for green and red light obtained under the same experimental conditions are compared. Finally, the conclusions obtained from the analysis of our results are summarized.

2. Materials and Methods

In this section, we describe first the experimental set-up composed by the individual subsystems to obtain the intensity angular distribution at the fiber output, the frequency response, the power budget and the overall transmission performance through the measurement of Far Field Pattern (FFP) images, S_{21} transmission parameter, received optical power and BER, respectively. To obtain these measurements as a function of length under the same launching conditions, we used a protocol based on the cut-back method.

Secondly, we describe a control experiment devised to compare the behavior of the fibers with two wavelengths: 520 nm and 650 nm, under similar conditions.

2.1. Fibers and Experimental Set-up

The three analyzed fibers, manufactured by Mitsubishi, were all step-index with 1 mm core diameter, but had different numerical apertures. The MH4001 (MH), also called ESKA-MEGA, is a low-aperture fiber with NA of 0.3. This lower aperture is achieved by a double-cladding design [4]. The GH4002 (GH) is a duplex fiber with NA of 0.5, also

termed ESKA-PREMIER. Finally, the BH4001 (BH), with the higher NA, 0.58, is a fiber resistant to high temperatures with a thermoset polymer jacket adequate for automotive or avionics applications.

A diagram of the experimental set-up is schematized in Figure 1, where separate blocks labeled (a) to (d) are used to obtain the different measurements. As they have been thoroughly explained elsewhere, we only give a very short description here [16,17].

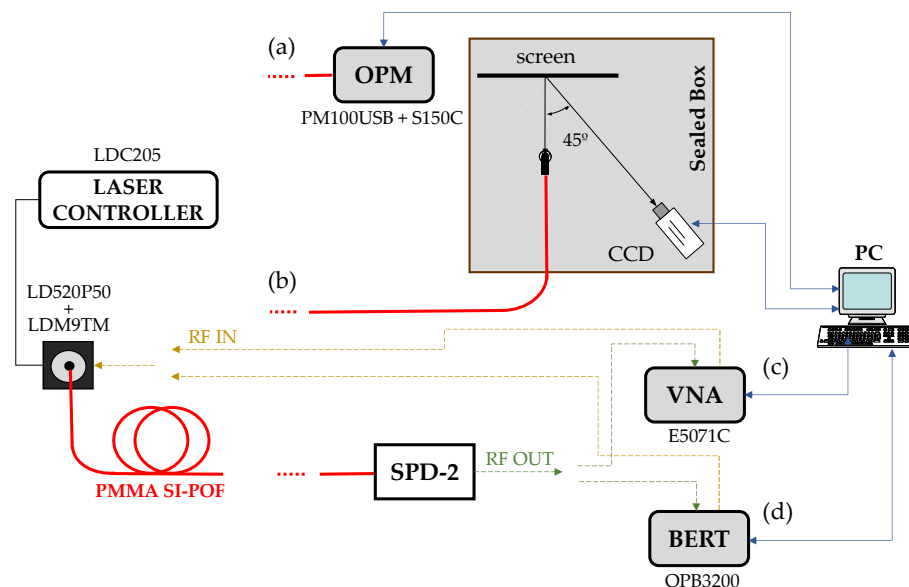


Figure 1. Experimental set-up with different subsystems to obtain (a) Received optical power, (b) FFP images, (c) S_{21} transmission parameter, and (d) Bit Error Rate.

The fiber input end was connected to the laser diode using a ST connector, while the output end was connected to a different device depending on the measurement to perform. The optical source used was the laser diode LD520P50 (LD520 in the following) with a nominal output power of 50 mW at 520 nm. The bias current was set to 80 mA at 25 °C, using the LDC205 laser controller and the LDM9T laser mount from Thorlabs. This laser mount is used to build an optical transmitter by directly modulating the laser diode either using the RF output of a Vector Network Analyzer (VNA E5071C from Agilent) or, using the data output of a BER Tester (OptoBERT™ OPB3200 from Optellent. Inc.). Both for the frequency domain characterization and the BER performance measurements, the receiver used was the SPD-2_650 (SPD) from Graviton with a nominal 3-dB bandwidth of 1.2 GHz, but with a good response up to 3 GHz. Its responsivity is 1 mV/mW at 650 nm, and 0.6 mV/mW at 520 nm. The SPD RF output was connected either to the VNA to obtain the S_{21} transmission parameter or to the BER Tester to measure error-rates, as depicted in Figures 1(c) and (d). The SPD also has a ST connector for the fiber. The received optical power was directly measured using an optical power-meter PM100USB with a S150C sensor, both from Thorlabs, connected to the fiber through a SMA connector, Figure 1(a). Finally, as shown in Figure 1(b), the output end of the fiber was placed in a VL connector at a distance of 7.5 cm from a white screen, to register the reflected FFP image by means of a 12-bit monochrome camera (QICAM FAST 1394CCD).

2.2. Experimental Methodology

The experimental protocol was the following: We started with the longest fiber length whose input end was cleaved, stripped, and inserted into a ST connector. The connector end was polished using two sandpapers with different roughness levels, and connected to the laser mount, where it remained invariable throughout the duration of the experiment to ensure that all fiber lengths were tested under the same launching conditions.

Then, we applied the same process to the output fiber end and connected it to the different devices to measure S_{21} parameter, optical power, FFP and BER. For each fiber length, the output end was cleaved, stripped and polished twice. The optical power and S_{21} parameter were measured at least five times, always changing the receiver or power-meter connection. Fifteen FFP images were registered to obtain an average. The BER was measured as a function of data rate for a basic OOK transmission using a PRBS pattern length of $2^{23}-1$. When the whole set of measurements was completed, a fiber segment was cut from its output end to get a shorter fiber. The output end of the remaining fiber was prepared, and a complete set of measurements was repeated for that fiber length.

This protocol was applied to the three fibers considered, but starting from a different fiber length depending on their different characteristics. This starting length was 130 meters for the MH, 150 meters for the GH, and 100 meters for the BH fiber. All the analyzed fibers were reeled over a 20-cm spool. For the GH fiber, we used the advantage of the GH duplex reel to run this experimental protocol simultaneously for red and green light. One of the two fibers of the duplex was connected to the LD520 and the other to a red laser diode, LD650P007 (LD650, 7 mW at 650 nm) that was placed into another LDM9T mount driven by a LDC200 controller set to 35 mA at 25 °C. In this duplex experiment, the input ends of both fibers were fixed, while the output ends were connected sequentially to the different devices to obtain the complete set of measurements for both wavelengths at a given fiber length. The input ends of the two fibers of the duplex were split over a segment of 10 cm to permit the connection of each end in a different laser mount. At the output end, the split segment of the duplex fibers was only 3 cm, because the fibers were alternatively connected to the various devices.

We also designed a control experiment to determine if the fibers have different frequency responses depending on the wavelength. In this experiment, we fixed the launching conditions using a 15 cm ST-connectorized fiber pigtail to inter-connect one of the two LD sources to the tested fiber. The purpose of this launching technique was to provide an overfilled launch where the source optical power is coupled up to the fiber high order modes or angles [4]. Conversely, direct injection, such as achieved in the previously described cut-back method, is usually underfilled i.e., optical power is concentrated only at low angles, and in addition, is prone to large variability [18]. The wide angular distribution provided by the pigtail is very stable and more independent on the source spatial characteristics. Thus, we measured the S_{21} transmission parameter with one end of the pigtail connected to one of the two LD sources, and with the other connected to one of the fibers. The other end of the tested fiber was connected to the receiver and remained connected when the pigtail input end was changed from the LD520 to the LD650. Thus, the detection conditions were exactly the same for the two wavelengths, while the variability of the input conditions was minimized by the indirect launch. This protocol was applied to the three fiber types using individual segments of three different lengths: 15, 20 and 50 meters, and was repeated several times using the SPD receiver. Also, another commercial receiver, SPA-2_650 from Graviton (SPA) was considered for the sake of completeness, which is intended for detecting light with higher numerical apertures than the SPD guaranteeing that most of the optical power at the output of the fiber is captured. The SPA has the same responsivity as the SPD at the two wavelengths and a slightly lower frequency response with 3 dB bandwidth of 1 GHz that drops more abruptly than for the SPD.

3. Results and Discussion

This section is organized in two different subsections to display and discuss the results obtained applying the experimental protocols described above. First, we compare the transmission properties of the three analyzed fibers as a function of the fiber length using the green laser diode as the transmitter source. Then, the frequency responses obtained with the red and the green laser diodes under overfilled launching conditions are examined to assess the differences in transmission between both wavelengths.

3.1. Transmission Properties using Green Light as a Function of Fiber Length

In this subsection we present a thorough characterization of the transmission properties of the fibers, including spatial properties, time/frequency properties and overall transmission performance. The spatial properties of light at the output of the fibers were characterized in terms of Encircled Angular Flux (EAF) obtained from FFP measurements, while the fiber frequency response was calculated from measurements of the S_{21} transmission parameter of the link. Finally, the measurement of BER as a function of data rate completes the characterization giving a full picture not only of the fiber but of the whole link. In order to ease the comparison of the different fibers, numerical parameters are extracted from these characterization measurements: optical power, EAF width, fiber 3-dB bandwidth, and maximum data-rates for a given BER value are obtained as a function of fiber length and allow us to evaluate the influence of the fiber numerical aperture.

The EAF, obtained from the measured FFP, is a particularly interesting way to represent the spatial distribution of optical power because it represents the portion of power contained in a given solid angle [19]. Figure 2 displays the EAFs obtained for the MH on the left, for the GH in the middle and for the BH on the right, at several selected lengths: 100, 50, 20, 15 and 1 meters, and at the maximum measured length that was different for each fiber.

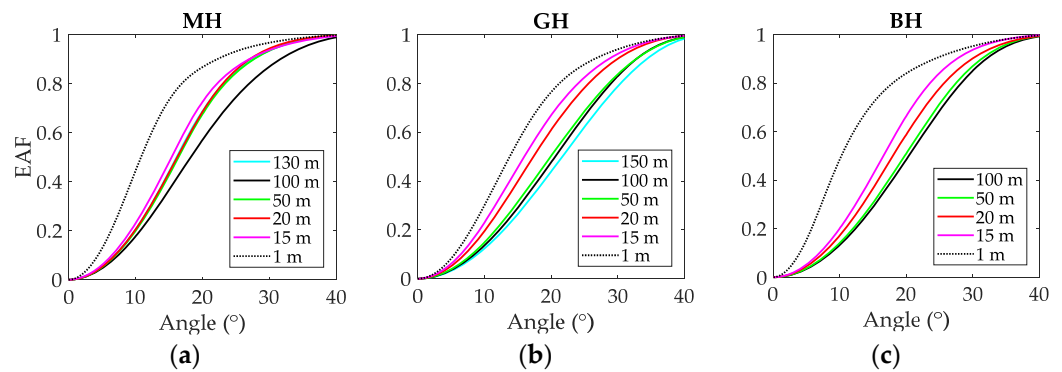


Figure 2. EAFs at selected fiber lengths: (a) MH fiber, (b) GH fiber, and (c) BH fiber.

The graphs illustrate the different behavior of the fibers. First, we observe that the EAF for the 1-meter MH and the 1-meter BH are very narrow, suggesting an underfilled launch, while the EAF for the 1-meter GH is wider. As we said before, the direct launch is rather variable and it is possible to get very different launching conditions depending on the fiber termination and connector position [18]. The EAFs for the two POFs with wider NAs, GH and BH, exhibit a steady widening with increasing fiber length, as should be expected by power diffusion [16]. From 50 meters, these EAFs only show small changes which indicates that the equilibrium mode distribution was reached at the maximum measured length for both fibers. However, the MH displays a different behavior: there is not a monotonous increase of EAF width with length, and the widest EAFs was found at 100 meters rather than at 130 meters. During the experiments, we observed that, particularly for this fiber, the end polishing produced relevant changes both in the output power and in the shape of the FFP, which introduced a high variability over these measurements. We suggest that this behavior can be explained by alterations in its double-cladding structure incurred when applying the sandpaper.

As for the fiber frequency response, it was obtained from the measurement of the S_{21} transmission parameter, for a given length L , according to:

$$H_L(f) = \left(\frac{S_{21,L}(f)}{S_{21,REF}(f)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

where $S_{21,L}(f)$ is the link transmission parameter measured for a fiber length L , and $S_{21,REF}(f)$ is the transmission parameter for a 1-meter fiber segment. This last measurement was taken at the end of the cut-back experiment under the same launching conditions, and is used as a reference to account for the frequency response of the active devices. The frequency responses for the MH, GH and BH fibers are represented on the left, middle and right plots of Figure 3, respectively. The lines show the average of 5 measurements, and the error bars their standard deviation. The lengths shown for all fibers are: 100, 70, 50, 30, 20 and 15 meters. The frequency responses for the longest measured lengths are also shown for the MH (130 m) and the GH (150 m).

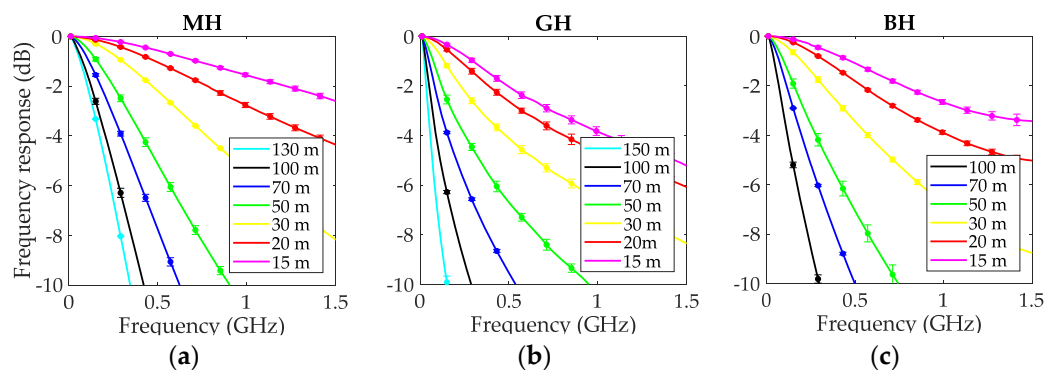


Figure 3. Normalized frequency response at selected fiber lengths: (a) MH fiber, (b) GH fiber, and (c) BH fiber.

All graphs show that the fiber frequency response narrows with increasing fiber length by the effect of modal dispersion. A comparison of the graphs reveals that the MH has the flattest frequency responses at all lengths that is consistent with its reduced NA of 0.3. The GH and the BH fibers display similar frequency responses, although the BH fiber responses are clearly better for 15 and 20 meters. We argue that the cause of the difference is that the GH responses were measured with overfilled launch, which was made plain by its wider EAF for 1 meter (Figure 2). In the overfilled launch, power is injected at high propagation angles increasing modal dispersion that degrades the frequency response particularly for shorter fiber lengths.

Finally, the measurements of transmission performance were carried out by analyzing the bit error rate for a simple data transmission varying the data rate. Results in terms of BER versus data rate in Mb/s are shown in Figure 4 in the same way as in the previous figures. The curves are shown for the same lengths as for the frequency responses, except that the BER for 10 meters is represented instead of that for 15 meters.

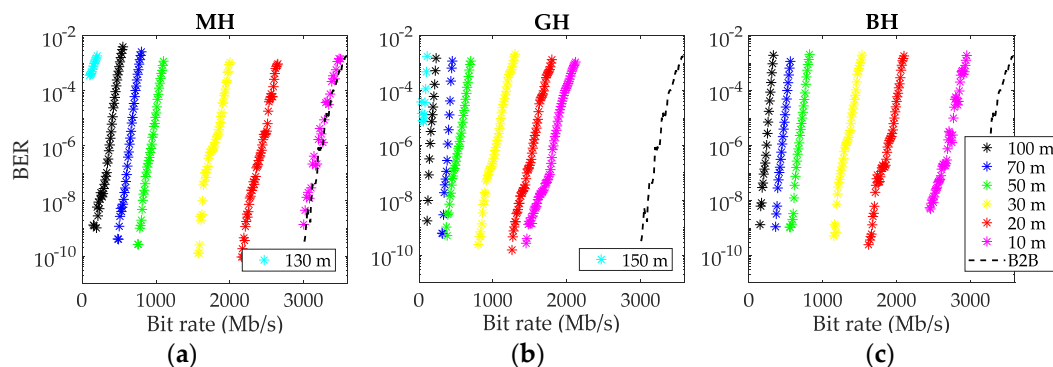


Figure 4. BER as function of bit rate in Mb/s at selected fiber lengths: (a) MH fiber, (b) GH fiber, and (c) BH fiber.

For the three fibers, the link worked even for the longest measured length, although in the cases of the MH and the GH, only at very low bit rates and with a high BER value. When decreasing the fiber length, the curves are pushed to the right, and the link can work at higher bit rates. For a 10-meter MH fiber, the link shows no penalty to the back-to-back (B2B) condition. The B2B curve was obtained with a very short fiber segment and describes the system limitation due to the transmitter and receiver. For the GH and BH fibers, link length has to be shortened below 5 meters to cancel the penalty, consistently with their lower frequency responses.

In order to have a better picture of the evolution of the fiber properties with length, Figure 5 shows the transmission parameters extracted from the measurements above for all the fiber types in the same graph. In all graphs, the data obtained using the LD520 are represented for the MH fiber with blue circles; for the GH, with green upright triangles, and for the BH, with cyan squares. In all graphs, the data obtained for the other GH fiber in the duplex reel using the LD650 are represented with red inverted triangles to compare the properties obtained with red and green light.

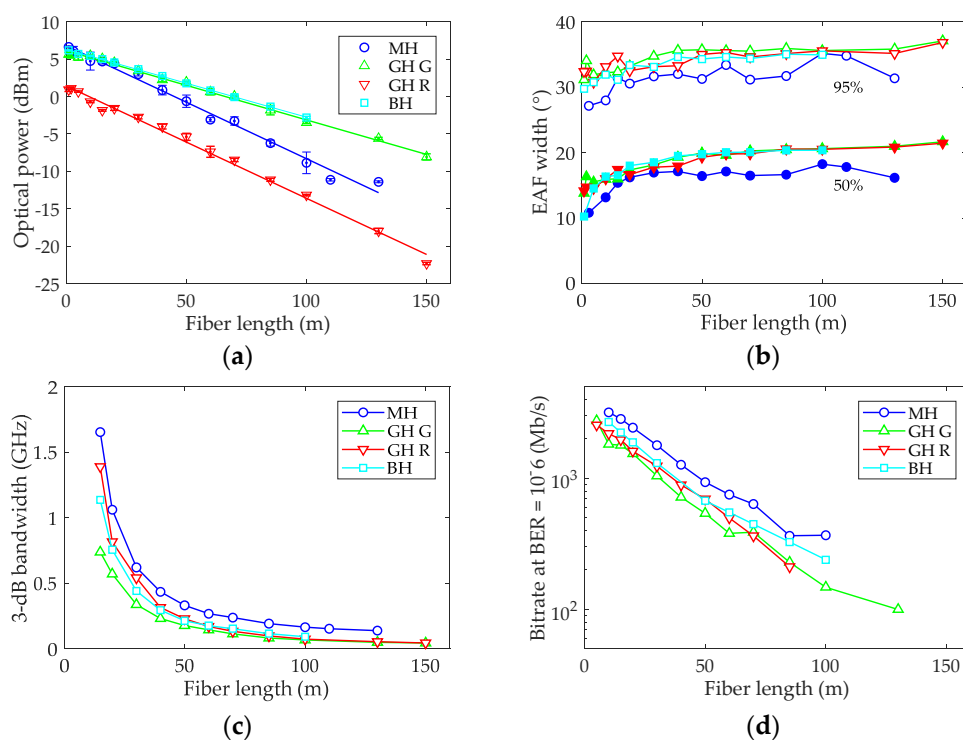


Figure 5. Transmission parameters as a function of fiber length for the MH, GH and BH fibers: (a) Optical power; (b) 3-dB bandwidth; (c) EAF width at 50% and 95% power; (d) data-rate for BER = 10⁻⁶.

On the left upper graph, Figure 5(a), received power versus fiber length is shown for the three fibers with the LD520 and for the GH additionally with the LD650. The symbols represent the averages and the error bars the standard deviation of the measurements. The straight lines show the linear fits to the experimental data. Their slopes represent the fiber attenuation at that wavelength and are: 0.09 dB/m for the GH and the BH, and 0.15 dB/m for the MH at 520 nm. The attenuation obtained at 650 nm for the GH is 0.15 dB/m, clearly above the value obtained at 520 nm. The attenuation at 650 nm for MH and BH, stated in their characteristics sheets are 0.16 dB/m and less than 0.2 dB/m, respectively, which confirm the lower attenuation for all fibers at 520 nm. For the MH the difference is less significant than for the higher NA fibers, but data for this fiber has higher variability as demonstrated by its larger error bars.

The right upper graph, Figure 5(b), shows the EAF width both for the 50% and for the 95% of encircled power, as a function of fiber length. The graph shows how the MH spatial distribution is the narrowest with an EAF width at 50% power of 16° , consistent with its lower aperture, whereas for the other fibers, this value is slightly above 20° . The differences between GH and BH, and between the red and green results for the GH are not significant. Notice that the width increase is quite smooth for the measurements obtained for the GH and BH, but shows an irregular trend for the MH that we attribute to the effect of end polishing over its double-cladding structure.

The left and right lower graphs, Figures 5(c) and (d) show the 3-dB bandwidth and the data rate for a BER of 10^{-6} as a function of fiber length, respectively. Both graphs illustrate how the MH fiber presents a superior performance with the highest bandwidths and bit rates for all fiber lengths, consistent with its reduced modal dispersion due to its lower NA. In fact, this fiber can support Gigabit data-rates up to 50 meters. However, error-rates below 10^{-6} cannot be obtained with this fiber above 100 meters, because of the low received power due to its higher attenuation. For all fibers, the maximum data rates with BER of 10^{-6} are higher than 100 Mb/s at 100 meters, and exactly this bit rate for the GH fiber at 130 meters, confirming that POFs are suitable for industrial and avionics data networks. In addition, even the high-aperture fibers are able to sustain 1 Gb/s for links of 30 meters or less, and thus, to meet the typical requirements for domestic and automotive applications. Moreover, these bit rates could be risen by introducing modulation formats to increase spectral efficiency and Forward Error Correction (FEC) techniques to permit BER values up to 10^{-3} , whereas the link reach could be pushed farther using receivers with a higher responsivity at 520 nm wavelength.

Although previous results showed that the performance for the standard GH fiber was significantly better than for the heat-resistant BH [20], here we found only small differences between the GH and the BH, even with a slight superiority of the BH that we attribute to their different launching conditions illustrated before by the differences between their 1-meter EAFs. Another possible reason is that, in this work, we have tested a recently acquired spool of BH fiber with improved characteristics. In addition, the duplex reel configuration can also affect the fiber properties, as it is necessary to split a segment at both ends, which can introduce additional disturbances in the power distribution of the GH fiber.

The lower graphs show that there are small differences in the frequency domain performance obtained for red and green light with the GH fiber. From 50 meters downwards, the fiber bandwidths obtained at 650 nm are always higher than those obtained at 520 nm, with the differences increasing for shorter fiber lengths. For 15 meters, bandwidths of 729 MHz and 1390 MHz were obtained for green and red light, respectively. Moreover, the maximum data rate is also higher with red light below 85 meters, although the red link does not work above 85 meters due to the low received power. From these results, we cannot discard that the cause of the differences between red and green are their diverse launching conditions and high variability, increased by the fiber duplex configuration. Therefore, we carried out the control experiment previously described to determine if there are significant differences between the frequency responses for 650 nm and 520 nm measured under the same conditions. The results are shown in the next subsection.

3.2. Frequency Responses for Red and Green Light

We have obtained the frequency responses with the experimental protocol described above, specifically designed to maintain similar launching conditions with both wavelengths by using a pigtail that was alternatively connected to the two laser diodes. In addition, the detection conditions were identical because the connection to the SPD receiver remained in place when changing sources. In these experiments, we tested the three fiber types for both sources using segments of three different lengths: 50, 20, and 15 meters. The measurements were repeated twice but in Figure 6, the results of only one session are shown. Normalized frequency responses for both wavelengths and the three fiber lengths

are plotted in the left, middle and right graphs, respectively. In all graphs, a second set of measurements is shown for the GH fiber. These measurements were taken using the other fiber of the duplex segment in order to assess fiber variability.

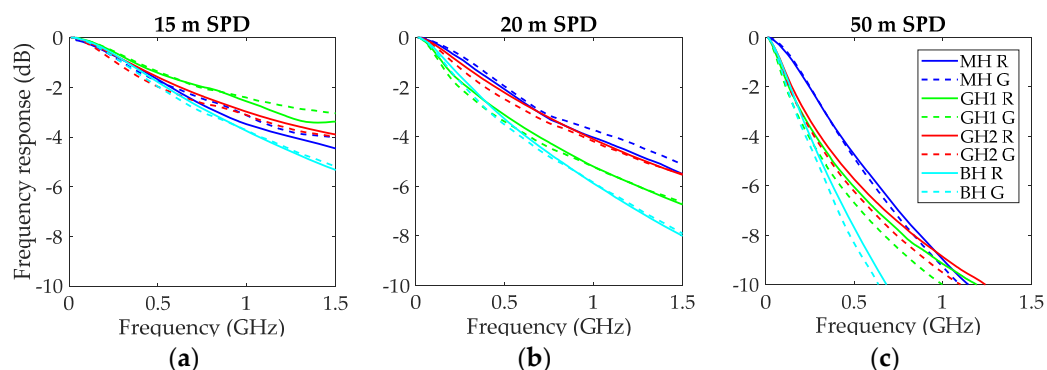


Figure 6. Normalized frequency responses obtained with a pigtail launch and the two laser diodes using the SPD receiver: (a) Fiber length of 15 m; (b) Fiber length of 20 m; (c) Fiber length of 50 m.

The results show that, for all fibers types and lengths, there are only very small differences between the frequency responses with red and green light. However, with a few exceptions (15 and 20 m MH, and 15 m GH), the measurements with red light are above those obtained with green light. In the three exceptions, the curves show oscillations that can be attributed to small variations in the reference due to the changes at the connection of the RF cable from one mount to the other which are necessary to perform both measurements. The S_{21} transmission parameter measurements are similar for short fibers and for the reference, so that any small alteration is magnified in the calculation of the fiber frequency responses as its quotient (see Equation (1)). In addition, the differences between the two measurements for the GH fiber, particularly those obtained for the 20-m segment, are greater than for the measurements with red and green lights that suggests that fiber variability has more impact than the possible differences between wavelengths.

At this point, it is important to note that the SPD receiver from Graviton is equipped with a lens to focalize the light onto its active area, so that it has a small aperture of 0.25 (14.5°). Thus, the SPD lens filters out a high percentage of the fiber output power. The EAFs in Figure 2 show that this percentage is between 25% and 55% for the GH and BH, and even less for the MH. We suppose that this filtering effect could be masking the differences between measurements with red and green light. For this reason, we also performed the control experiment using the SPA receiver, also from Graviton, whose lens has an aperture of 0.5 (30°) and thus, it is able to capture practically all the power that exits the fibers. Figure 7 shows the results using the SPA in the same way as in Figure 6.

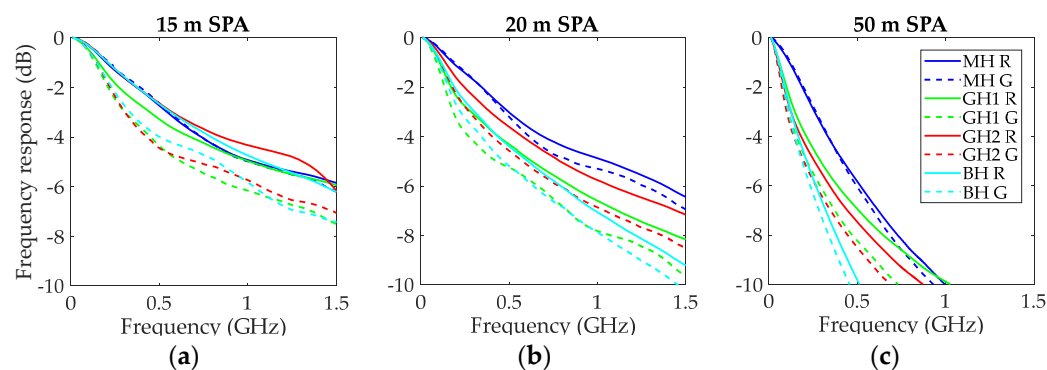


Figure 7. Normalized frequency responses obtained with a pigtail launch and the two laser diodes using the SPA receiver: (a) Fiber length of 15 m; (b) Fiber length of 20 m; (c) Fiber length of 50 m.

A comparison of the corresponding graphs in Figures 6 and 7 reveals that the frequency responses obtained with the SPD are flatter than those obtained with the SPA. This effect is not owed to the better response of the SPD, because its effect was taken into account by the reference in Equation (1). The reason is the spatial filtering due to the small aperture of the SPD receiver that enhances the frequency response, because it blocks power carried by middle and high order modes that, as they propagate through longer paths inside the fiber, introduce higher delays that degrade the fiber frequency response [21].

Thus, the use of the SPA receiver with a higher aperture reveals larger differences between both wavelengths for the GH and BH fibers. On the other hand, for the MH they are similar to those obtained with the SPD, because both receivers are able to capture most of its output power due to its lower NA. For the GH and the BH, differences between wavelengths are reduced with increasing length. In fact, at 50 meters, they are similar to those obtained with the SPD, because the filtering is less effective as the power distributions are close to equilibrium with a nearly complete mode mixing. In Figure 8, we represent the 3-dB bandwidths calculated from all the frequency responses obtained in the two sessions.

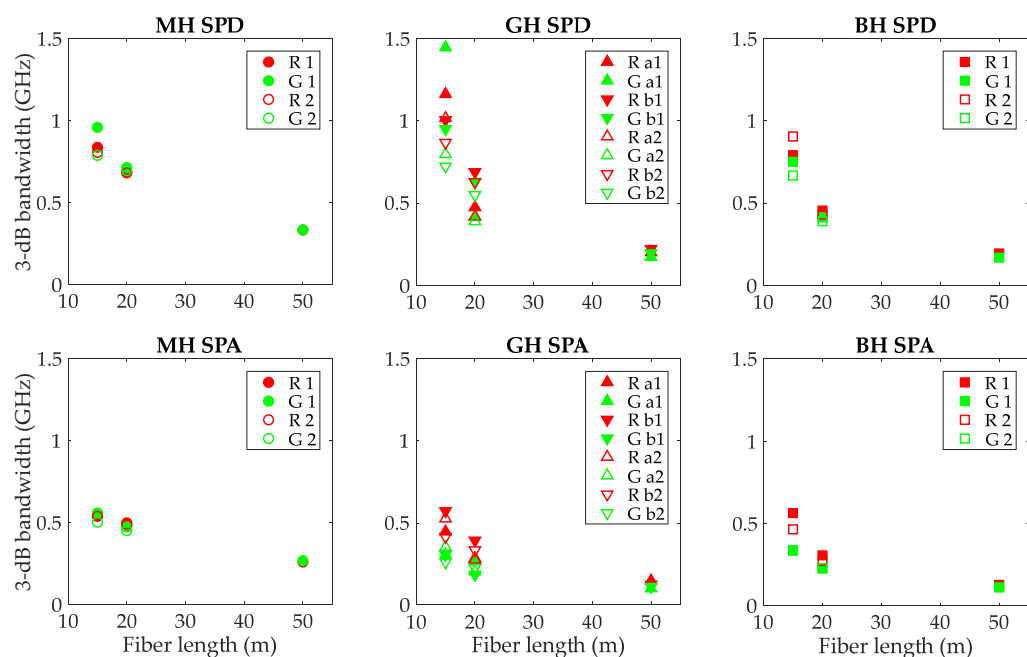


Figure 8. Evolution of the 3-dB bandwidth with length for the three fibers and the two receivers. Upper graphs: results obtained with the SPD; Lower graphs: results obtained with the SPA; From left to right, data for the MH, GH and BH fibers, respectively.

This figure confirms that the fiber bandwidths are better for red light for the two high-NA fibers, and that the differences decrease with fiber length being practically negligible at 50 meters. On the other hand, the figure reveals only insignificant differences in the bandwidths at red and green wavelengths for the MH fiber and all tested lengths. Therefore, we conclude that, at least for the high-NA fibers, modal dispersion is higher for green than for red light. We propose that one of the causes underlying the higher dispersion is the larger number of modes that the fiber is able to transmit at shorter wavelengths. For a SI fiber, the number of modes N is given by: $N = V^2/2$, with the normalized frequency, V , defined as:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{ NA} \quad (2)$$

where a is the fiber radius (approximately 500 μm for the PMMA POFs considered) and NA its numerical aperture. Thus, the number of modes is inversely proportional to the squared wavelength implying an increase of 1.6 times when using the 520 nm laser diode. As the number of modes is also proportional to the square of the fiber NA, this explanation is consistent with the different behavior found for the low-NA MH fiber. In addition, we suggest that another contribution to the increase of modal dispersion can be the higher diffusion for shorter wavelengths. Diffusion in PMMA fibers has been attributed to Rayleigh and Mie scattering [13] whose dependence with wavelength is consistent with our findings. As Rayleigh scattering varies with λ^{-4} , and Mie scattering approximately with λ^{-2} , both effects are expected to be greater at 520 than at 650 nm [13,22]. Therefore, the combination of the increased number of modes and the stronger diffusion for the 520-nm wavelength explains the higher modal dispersion that is behind the behavior of our measured frequency responses.

4. Summary and conclusions

We confirmed the lower attenuation of large-core PMMA step-index fibers of different numerical apertures at the 520-nm wavelength. In fact, an attenuation coefficient as low as 0.09 dB/m was found at this wavelength for the BH and GH fibers. On the other hand, our results suggest that green light introduces higher modal dispersion attributable to the higher number of modes combined with a stronger diffusion that is consistent with the wavelength dependence of the predominant scatterings in PMMA. However, its impact on fiber bandwidth is not large so that transmission performance is not highly compromised. Therefore, the use of green optical sources is particularly interesting for long links where its lower attenuation is crucial, while the bandwidth is practically the same as measured with equivalent red sources. Actually, we found that all tested fibers are able to carry Fast-Ethernet data at 100 meters as required for industrial environments. Our results show that the differences of attenuation and frequency response between red and green light are smaller for the MH than for the other fibers, consistent with its lower aperture. In fact, the maximum length achievable with this fiber is limited by attenuation but, on the other hand, its reduced dispersion allows reaching higher bit rates than with any of the other fibers below 100 meters. Thus, the MH fiber is suitable as the base of high-capacity links demanded for domestic and automotive applications as it supports Gigabit rates up to 50 meters. The heat-resistant BH fiber showed a very good performance at 520 nm reaching rates above 100 Mb/s at 100 meters. In addition, its lower attenuation for green light can help to mitigate the problem of the stringent power budget in avionic networks. Moreover, the introduction of spectrally efficient modulation formats, the application of equalization and FEC techniques, and the use of receivers with a higher responsivity for green light could increase these bandwidth-length products.

Author Contributions: Conceptualization, M.Á.L.; methodology and data acquisition, M.M, M.Á.L, A.L. and C.M.; writing—original draft preparation, M.Á.L. and M.M; writing—review and editing, A.L. and J.M.; supervision, M.Á.L. and J.M.; project administration and funding acquisition, M.Á.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation (MICINN/FEDER), grant number RTI2018-094669-B-C33, by the Aragón Government (DGA), grant number T20-20R, and by Altran Innovación S.L.U. under OTRI grant 2019/0626.

Data Availability Statement: The original contribution for this study is included in the article.

Acknowledgments: M.M. and C.M. acknowledge the Mobility City – University of Zaragoza Chair for the scholarships received.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Zubia, J.; Arrue, J. Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications. *Opt. Fiber Technol.* **2001**, *7*(2), 101-140, doi: 10.1006/ofte.2000.0355. 436
2. Koeppen, C.; Shi, R.F.; Chen, W.D.; Garito, A.F. Properties of plastic optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. B* **1998**, *15*(2), 727-739, doi: 10.1364/JOSAB.15.000727. 438
3. Koike, Y.; Inoue, A. High-Speed Graded-Index Plastic Optical Fibers and Their Simple Interconnects for 4K/8K Video Transmission. *J. Light. Technol.* **2016**, *34*(6), 1551-1555, doi: 10.1109/JLT.2016.2517086. 439
4. Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P.E.; Daum, W. *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, Springer: Berlin, Germany, 2008, pp. 766-801, ISBN 978-3-540-76629-2. 440
5. Nespola, A.; Straullu, S.; Savio, P.; Zeolla, D.; Abrate, S.; Cardenas, D.; Ramirez Molina, J. C.; Campione, N.; Gaudino, N. First demonstration of real-time LED-based Gigabit Ethernet transmission of 50 m of A4a.2 SI-POF with significant system margin. In Proceedings of the 36th European Conference on Optical Communication (ECOC), Torino, Italy, 19-23 September 2010, doi: 10.1109/ECOC.2010.5621396. 441
6. Grzemba, A. *MOST: the automotive multimedia network*; Francis Verlag, 2011, ISBN 9783645650618. 442
7. Knowledge Development for POF (KDPOF) | POF Combined with Wi-Fi. Available online: <https://www.kdpof.com/home-soho/> (accessed on 7 August 2021). 443
8. Truong, T.K. Boeing commercial airplanes fiber optic evolution—Applications of POF in commercial aircraft. In Proceedings of the POF Symposium held at Optical Fiber Communications Conference (OFC), Anaheim, CA, USA, 20-24 March 2016. 444
9. López, A.; Losada, M.A.; Mateo, J. Last mile systems, in-house-networks, LAN- and MAN-applications: Polymer optical fibers, POF. In *Optical and Microwave Technologies for Telecommunication Networks*; Strobel, O., Ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2016, pp. 306-328, doi: 10.1002/9781119114857.ch10. 445
10. Loquai, S.; Kruglov, R.; Ziemann, O.; Vinogradov, J.; Bunge, C.-A. 10 Gbit/s over 25 m Plastic Optical Fiber as a Way for Extremely Low-Cost Optical Interconnection. In Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC), Washington DC, USA, 21-25 March 2010; doi: 10.1364/OFC.2010.OWA6. 446
11. Ciordia, O.; Perez, R.; Pardo, C. Optical communications for next generation automotive networks. In Proceedings of the 22nd Microoptics Conference (MOC), Tokyo, Japan, 19-22 November 2017; doi: 10.23919/MOC.2017.8244478. 447
12. Truong, T. K. Trends in Airplane Systems and the Need for More Fiber. In Proceedings of the 27th International Conference on Plastic Optical Fibers. Seattle, WA, USA, 4-6 September 2018. 448
13. Bunge, C.A.; Kruglov, R.; Poisel, H. Rayleigh and Mie Scattering in polymer optical fibers. *J. Light. Technol.* **2006**, *24*(8), 3137-3146, doi: 10.1109/JLT.2006.878077. 449
14. Kruglov, R.; Loquai, S.; Vinogradov, J.; Ziemann, O.; Bunge, C.A.; Bruederl, G.; Strauss, U. 10.7 Gb/s WDM Transmission over 100-m SI-POF with Discrete Multitone. In Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC), Anaheim, CA, USA, 20-24 March 2016. 450
15. Kruglov, R.; Vinogradov, J.; Ziemann, O. Gigabit Transmission over Standard POF beyond 50 m. In Proceedings of the 27th International Conference on Plastic Optical Fibers, Seattle, WA, USA, 4-6 September 2018. 451
16. Mateo, J.; Losada, M.A.; Garcés, I.; Zubia, J. Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers. *Opt. Express* **2006**, *14*(20), 9028-9035, doi: 10.1364/OE.14.009028. 452
17. López, A.; Villar N.; Losada A.; Laporta, E.; Mateo, J. Experimental Characterization of the Transmission Properties of Large-Core Graded-Index PMMA Fibers. In Proceedings of the 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 19-23 July 2020, doi: 10.1109/icton51198.2020.9203441. 453
18. López, A.; Losada, A.; Mateo, J.; Zubia, J. On the Variability of Launching and Detection in POF Transmission Systems. In Proceedings of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 1-5 July 2018, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473583. 454
19. Tao, R.; Hayashi, T.; Kagami, M.; Kobayashi, S.; Yasukawa, M.; Yang, H.; Robinson, D.; Baghsiahi, H.; Fernández, F.A.; Selviah, D.R. Equilibrium modal power distribution measurement of step-index hard plastic cladding and graded-index silica multi-mode fibers. *Proc. SPIE* **2015**, *Optical Interconnects XV 9368*, Conference: SPIE Photonics West, San Francisco, CA, USA, doi: 10.1117/12.2079355. 455
20. López, A.; Losada, M. A.; Mateo, J.; Jiang, X.; Richards, D.H.; Antoniadis, N. Transmission Performance of Plastic Optical Fibers Designed for Avionics Platforms. *J. Light. Technol.* **2018**, *36*(21), pp. 5082-5088, doi: 10.1109/JLT.2018.2855262. 456
21. Mateo, J.; Losada, M.A.; Zubia, J. Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation. *Opt. Express* **2009**, *17*(4), 2850-2860, doi: 10.1364/oe.17.002850. 457
22. Bikandi, I.; Illarramendi, M.A.; Durana, G.; Aldabaldetrekue, G.; Zubia, J. Spectral Dependence of Scattered Light in Step-Index Polymer Optical Fibers by Side-Illumination Technique. *J. Light. Technol.* **2014**, *32*(23), 4539-4543, doi: 10.1109/JLT.2014.2360854. 458