



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Caracterización Individualizada de las Propiedades de Transmisión de los Núcleos en Fibras Ópticas de Plástico Multinúcleo (MC-POF)

Individual Characterization of Core
Transmission Properties in Multicore Plastic Optical
Fibers (MC-POF)

Autora

Silvia Serón Casabona

Directora

Alicia López Lucía

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021

RESUMEN

Este proyecto se enmarca dentro de la línea de investigación en fibras ópticas de plástico del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), de la Universidad de Zaragoza.

Con este proyecto se pretende avanzar en el estudio sobre la aplicación de la tecnología asociada a las fibras ópticas de plástico (POFs) existentes como alternativa a la convencional fibra de vidrio (GOF), presentándose como un medio de transmisión ventajoso para entornos de corto alcance. En concreto, el trabajo que se ha realizado es la caracterización experimental e individualizada de las propiedades de transmisión de los núcleos de una fibra de plástico multinúcleo comercial, MC-POF (MultiCore POF).

El trabajo consta de tres partes diferenciadas. En primer lugar, se ha puesto a punto un sistema de inyección localizada basado en 6 motores y 2 cámaras, y se ha llevado a cabo un estudio para la adecuada selección de la fibra que será usada para realizar dicha inyección en la fibra MC-POF. Para ello, hemos comparado diferentes fibras de vidrio como inyectoras y comparado las propiedades de cada una de ellas a la salida de la fibra multinúcleo.

Una vez seleccionado el sistema en su totalidad, este ha sido utilizado para medir las propiedades de transmisión de las fibras MC-POF. El estudio de las propiedades ha consistido en medir la potencia transmitida, la distribución angular de la intensidad a la salida de la fibra y la respuesta en frecuencia. Este estudio se ha realizado para una fibra MC-POF concreta, fabricada en PMMA y con 19 núcleos SI-POF (SMCK-1000P, Asahi-KASEI), si bien el sistema y el procedimiento de medida sería extrapolable a cualquier otra MC-POF. Particularmente, también se ha realizado medidas preliminares sobre una fibra PMMA de 9 núcleos (SH1009, Mitsubishi), si bien ésta tenía características mecánicas muy diferentes. El análisis no se ha limitado a un único segmento de fibra, sino que se han considerado varios segmentos de diferentes longitudes para tener una visión global de las propiedades de transmisión de la fibra.

Por último, se han realizado experimentos de transmisión de una señal digital a través de núcleos individuales de la fibra MC-POF considerando como formato de partida pulsos NRZ. Estas medidas han permitido constatar el gran potencial de este tipo de fibras, cuyo éxito está condicionado al desarrollo de multiplexores y demultiplexores que permitan implementar multiplexación espacial sobre ellas.

A mi familia

ÍNDICE

RESUMEN	2
ÍNDICE	4
ÍNDICE TABLAS Y FIGURAS.....	6
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	10
1.1. MOTIVACIÓN.....	10
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	11
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	12
Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE	13
2.1. FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO.....	13
2.1.1. PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN	15
2.1.2. FIBRAS MULTINUCLEO (MC-POF).....	18
2.2. SISTEMA DE INYECCIÓN LOCALIZADA.....	20
Capítulo 3 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE INYECCIÓN	23
3.1. CONFIGURACIÓN FUENTE ÓPTICA.....	24
3.1.1. MEDIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA.....	24
3.1.2. MEDIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ANCHO DE BANDA.....	26
3.2. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA FIBRA INYECTORA.....	28
3.2.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INTENSIDAD ÓPTICA	28
3.2.2. EFECTO SOBRE LA RESPUESTA FRECUENCIAL.....	32
Capítulo 4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LOS NÚCLEOS INDIVIDUALES DE MC-POF DE DISTINTAS LONGITUDES	35
4.1. POTENCIA TRANSMITIDA	35
4.2. DISTRIBUCIÓN ANGULAR DE LA INTENSIDAD A LA SALIDA DE LA MC-POF.....	37
4.3. RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	40
Capítulo 5 EXPERIMENTOS DE TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE LOS NÚCLEOS INDIVIDUALES DE MC-POF	44
5.1. EXPERIMENTOS DE TRANSMISIÓN DE SEÑALES NRZ PARA MC-POF.....	44

5.2. COMPARACIÓN CON OTRAS FIBRAS.....	52
Capítulo 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	55
REFERENCIAS.....	57
ANEXOS.....	59
ANEXO I. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS Y MANUALES.....	59
I.1. LÁSER LP660-SF40 Y BASE DE POLARIZACIÓN LDM9LP.....	59
I.2. FIBRA SMCK-1000P.....	62
I.3. FIBRA SH1009.....	63
I.4. FIBRA MONOMODO DE VISIBLE.....	65
I.5. DETECTORES SPA-2 Y SPD-2.....	66
ANEXO II. ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON FIBRA MC-POF SH1009.....	68
II.1. POTENCIA TRANSMITIDA.....	68
II.2. DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD.....	69
II.3. RESPUESTA FRECUENCIAL.....	71
ANEXO III. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DETECTORES SPD-2 Y SPA-2.....	72
III.1. COMPARACIÓN DETECTORES CON SMCK-1000P.....	72
III.2. COMPARACIÓN DETECTORES CON SH1009.....	73
ANEXO IV. COMPARACIÓN DIAGRAMAS DE OJO PARA DISTINTAS POFs DE LA MISMA LONGITUD.....	75
ANEXO V. CAMBIO DE COMPORTAMIENTO DE LA FUENTE ÓPTICA.....	76

ÍNDICE TABLAS Y FIGURAS

Figura 2. 1. Estructura de una fibra óptica (parte superior) y vista longitudinal con fenómeno de reflexión total a través de ella (parte inferior) [16].....	13
Tabla 2. 1. Tabla comparativa de las características de distintas POFs [17].	15
Figura 2. 2. Atenuación espectral de POF convencional compuesta por polimetil-metacrilato (izquierda) y de POF perfluorinada (derecha) [19][20].....	16
Figura 2. 3. 3 Atenuación espectral de dos fibras ópticas fabricadas con distintos materiales: PMMA y PS [21]	17
Figura 2. 4. Efecto de dispersión sobre un pulso transmitido en POF [21].	17
Figura 2. 5. Producto de ancho de banda y distancia para distintas fibras ópticas [22].	18
Figura 2. 6. Sección de POF de un solo núcleo (izquierda) y MC-POF de 13 y 19 núcleos (derecha) [1]	19
Figura 2. 7. Pérdidas por curvaturas para distintos tipos de POF [23].....	19
Figura 2. 8. Multiplexación espacial en MC-POF [24].....	20
Figura 2. 9. Sistema de inyección localizada utilizado en el laboratorio de POF de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza	20
Figura 2. 10. Imágenes tomadas por las cámaras del sistema de alineamiento: extremos de salida MC-POF (izquierda) y extremo de inyección (derecha).	21
Figura 2. 11. Etiquetado de los núcleos seguido para la fibra SMCK-1000P.....	22
Tabla 3. 1. Conversión resistencia a temperatura del termistor de la base de polarización LDM9LP.	24
Figura 3. 1. Curva Intensidad-Potencia fuente óptica en función de la temperatura.	25
Tabla 3. 2. Intensidad umbral en función de la temperatura de operación	25
Figura 3. 2. Esquema del montaje experimental para realizar las medidas de respuesta en frecuencia.	26
Figura 3. 3. Respuesta frecuencial tramo corto de GOF (izquierda) y de tramo de GOF+POF (derecha) en función de la corriente de polarización.....	27
Figura 3. 4. Respuesta frecuencial teórica, en función de la corriente de polarización, de un láser [15].....	27
Figura 3. 5. Esquemático del montaje experimental para las medidas de distribución espacial.	29
Figura 3. 6. <i>Distribución de intensidad y EAF a la salida de las 3 fibras de vidrio inyectoras del estudio.</i>	30

Tabla 3. 3. Anchuras a media altura de EAF y potencia a la salida de las fibras inyectoras.	31
Figura 3. 7. Distribución de intensidad y EAF de la fibra monomodo de visible en función de la corriente de polarización.....	31
Figura 3. 8. Distribución de intensidad y EAF de la fibra monomodo de visible en función de la temperatura de operación.....	31
Figura 3. 9. Respuesta frecuencial normalizada para distintas fibras inyectoras y las dos longitudes consideradas de MC-POF.	33
Figura 3. 10. Media y desviación estándar de la respuesta frecuencial normalizada para distintas fibras inyectoras y las dos longitudes consideradas de MC-POF.	33
Figura 4. 1. Potencia óptica a la salida de cada uno de los núcleos para los tres segmentos de SMCK considerados para el análisis.	36
Figura 4. 2. Atenuación relativa entre núcleos para los tres segmentos de SMCK considerados para el análisis.....	36
Figura 4. 3. EAF de cada núcleo de la SMCK considerando varias longitudes.	38
Figura 4. 4. EAF promedio y desviación estándar (izquierda) y distribución de intensidad promedio y desviación estándar (derecha) para todos los núcleos de los tres segmentos de fibra (10, 50 y 84 metros).....	39
Figura 4. 5. NA para todos los núcleos de los tres segmentos de fibra (10, 50, 84 metros)....	40
Tabla 4. 1. Valor de EAF a media altura para los tres segmentos de SMCK.....	39
Figura 4. 6. Respuesta en frecuencia para cada uno de los núcleos considerando distintas longitudes	41
Figura 4. 7. Respuesta frecuencial normalizada de enlaces de distinta longitud a través de cada uno de los núcleos: núcleo central, primera corona y segunda corona.....	42
Figura 4. 8. Respuesta frecuencial normalizada de enlaces de distinta longitud a través de cada uno de los núcleos: núcleo central, primera corona y segunda corona.....	43
Tabla 4. 2. Anchos de banda medidos para los enlaces de distinta longitud.	43
Figura 5. 1. Esquema del montaje utilizado para obtener el BER y visualizar la señal en el osciloscopio.....	44
Figura 5. 2. Diagrama de ojo obtenido para fibra BH corta a una tasa de 200Mb/s	45
Figura 5. 3. Barrido BER para dos tramos de 80 cm POFs en función de la corriente de polarización [15].....	46
Figura 5. 4. Comparación BER en enlace de MC-POF de 5m a través de varios núcleos con dos tramos de fibra corta de POF convencional (BH y MH).....	47

Figura 5. 5. Comparación BER en dos enlaces de distinta longitud a través de cinco núcleos, 50 y 84 metros, con dos tramos cortos de POF convencional (BH y MH).....	48
Tabla 5. 1. Diagramas de ojo para SMCK 5 metros y BH 80 cm a 500 MHz.....	49
Figura 5. 6. Comparación BER para distintos enlaces de distinta longitud a través de varios núcleos; núcleo central, media núcleos primer anillo y media núcleos segundo anillo.	50
Tabla 5. 2. Diagramas de ojo para SMCK 5, 10 y 84 metros transmitiendo en 500 MHz y 700 MHz.....	51
Figura 5. 7. Media y desviación típica de BER para varias longitudes de SMCK por varios núcleos.....	52
Figura 5. 8. Comparación BER para distintas POFs de la misma longitud (50 m).	53
Figura 5. 10. Respuestas frecuenciales POFs 50 m.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. 3. Ancho de banda de las POFs estudiadas.....	54
Figura I. 1. Gráfica termistor resistencia-temperatura	61
Figura II. 1. Imágenes tomadas por las cámaras del sistema de inyección: extremo inyección (izquierda) y extremo salida SH1009 (derecha).....	68
Figura II. 2. Potencia a la salida de cada núcleo de la SH1009.....	68
Figura II. 3. Atenuación relativa entre núcleos de SH1009 de 10m.....	69
Figura II. 4. Distribución de intensidad y EAF en función del ángulo de salida para 8 de los 9 núcleos de la SH1009.....	69
Figura II. 5. Media y desviación estándar de las medidas de campo lejano para todos los núcleos de la SH1009.....	70
Figura II. 6. Comparación NA con la potencia de salida núcleo a núcleo de la SH1009.....	70
Figura II. 7. Respuesta frecuencial normalizada para todos los núcleos de la SH1009.	71
Figura II. 8. Media y desviación típica de la respuesta frecuencial de todos los núcleos de la SH1009.	71
Figura III. 1. Respuestas frecuenciales para dos núcleos de la SMCK de 84 metros con SPD-2 y SPA-2.....	72
Figura III. 2. Respuestas en frecuencia normalizadas para todos los núcleos con los dos detectores disponibles en el laboratorio.....	73
Tabla IV. 1. Diagramas de ojo para GI-POF y SMCK-1000P (núcleo 6), para tres tasas de transmisión distintas.	75
Figura V. 1. Respuesta frecuencial para los dos tramos de POF, BH (izquierda) y MH (derecha), en función de la corriente de polarización.....	76

Figura V. 2. Respuesta frecuencial del sistema normalizada de enlaces de distinta longitud a través de cada uno de los núcleos tras el cambio en el comportamiento del láser. 77

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Durante los últimos años, el uso de las fibras ópticas de plástico (POF, *Plastic Optical Fibers*) se ha incrementado notablemente, haciéndose hueco dentro de los medios guiados en los sistemas de comunicaciones. Si bien existen fibras ópticas de plástico de diferentes materiales y dimensiones, la POF convencional presenta un núcleo de 1 mm de diámetro y está fabricada en polimetil-metacrilato (PMMA). Este tipo de fibras ha conseguido competir con la convencional fibra óptica de vidrio (GOF, *Glass Optical Fiber*) o el cable coaxial, pionera en los medios guiados. Este hecho se debe a las ventajas adicionales que presentan, principalmente relativas a su tamaño, como su facilidad de manipulación y de acoplo de luz, lo cual permite el uso de fuentes ópticas de bajo coste, además de ventajas relativas al propio material, como la posibilidad de trabajar con longitudes de onda en el rango visible. Sin embargo, también encontramos unas ciertas limitaciones en el uso de las POF de PMMA, también debidas a sus características físicas (dimensiones y material). Por esa causa, poseen peores propiedades de transmisión que las fibras ópticas de vidrio, como elevada atenuación y ancho de banda relativamente pequeño [1], lo que ha determinado su ámbito de aplicación a redes de corto alcance [2-4]. Sin embargo, en la actualidad los requerimientos de ancho de banda de dicho tipo de enlaces de comunicaciones también han aumentado, lo cual ha motivado la búsqueda y estudio de nuevos tipos de fibra con mayor ancho de banda potencia.

Dentro las variantes de POF en PMMA que se comercializan con distintos perfiles de índice, encontramos las fibras ópticas de plástico multinúcleo, MC-POF (*MultiCore Plastic Optical Fiber*), formadas por varios núcleos ordenados generalmente en anillos alrededor de un núcleo central. El tamaño de estas es similar al de las POF convencionales, lo que hace que los núcleos sean de menor tamaño y, por tanto, que las pérdidas por curvaturas se vean reducidas [5]. Este hecho constituye una ventaja sobre las POF estándar de un solo núcleo. Además, la posibilidad de mejorar la capacidad de transmisión mediante el uso de alguna técnica multiplexación espacial que permita la transmisión en paralelo a través de cada núcleo, hace que las MC-POFs se hayan convertido en un foco de atención en las redes de comunicaciones de corto alcance. Para que ese aumento de capacidad sea efectivo, es necesario diseñar y fabricar elementos que realicen la multiplexación y demultiplexación espacial en los extremos transmisor y receptor, respectivamente. Además, es importante considerar las posibles degradaciones que pueden experimentar los flujos de información que se transmiten por cada núcleo. En este sentido, ya se determinó anteriormente que las MC-POF presentan muy buenas características para ser usadas con multiplexación espacial, ya que la transferencia de potencia óptica o *crosstalk* entre núcleos de es despreciable [6]. En este contexto, y continuando con el análisis de las posibilidades de la fibras multinúcleo, es necesario conocer las propiedades de transmisión de cada núcleo de forma individual, lo que requiere de una caracterización individualizada de los mismos.

El estudio realizado en este trabajo consiste en caracterizar experimentalmente las propiedades de transmisión de cada uno de los núcleos de una fibra MC-POF comercial mediante un sistema de inyección localizada. La caracterización consiste en la medida de las principales propiedades

de transmisión, tales como potencia y atenuación, respuesta en frecuencia y distribución angular de intensidad óptica, todo ello a la salida de la fibra multinúcleo. Como se ha comentado, el conocimiento de estas características individuales permitirá explorar el potencial de introducir técnicas de multiplexación espacial.

Como paso previo a la realización de este estudio, es necesario poner a punto y optimizar un sistema de inyección que nos permita controlar de forma precisa la alineación de las dos fibras (inyectora y MC-POF) para realizar la correcta inyección de la luz por cada núcleo. En primer lugar, caracterizaremos la fuente óptica. En este caso, la fuente empleada para realizar la inyección de la luz en la fibra consiste en un diodo láser LP660-SF40 de Thorlabs. Se trata de un láser conectorizado mediante rabillo de fibra monomodo de visible y montado sobre la base LDM9LP para su alimentación. Por otro lado, la configuración del sistema requiere determinar la fibra más adecuada para realizar la inyección localizada. En este sentido, se ha realizado un estudio detallado para la selección de la fibra de vidrio más adecuada para la inyección que nos permita realizar la caracterización lo mejor posible. El estudio se ha centrado en tres tipos de fibra de vidrio, que presentan dimensiones que permiten la inyección localizada. En concreto, se han considerado dos fibras estándar (monomodo y multimodo), además de una fibra monomodo de visible.

Como último punto, tras conocer las características de atenuación, ancho de banda y distribución espacial, se han llevado a cabo experimentos de transmisión de una señal digital a través de los núcleos individuales de la MC-POF. Estos experimentos nos permiten conocer la capacidad de transmisión de los núcleos, y estimar la potencial capacidad total de la MC-POF. Se ha considerado una transmisión NRZ y un transmisor y receptor de los disponibles en el laboratorio, si bien es importante notar que usando otros formatos con mayor eficiencia espectral y/o otros elementos activos con mejores características sería posible mejorar los resultados aquí presentados.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este proyecto se basa en el estudio y análisis de las propiedades de transmisión de cada uno de los núcleos en fibras ópticas de plástico multinúcleo (MC-POF), mediante un sistema de inyección localizada. Con este estudio se pretende determinar las aptitudes de este tipo de fibras para futuros sistemas de multiplexación espacial. A continuación, se exponen los diferentes objetivos que se pretenden conseguir.

- i. **Estudio de las condiciones de inyección.** Se seleccionará las condiciones de operación óptimas de la fuente óptica, y la fibra de vidrio que nos garantice mejores prestaciones para la inyección de luz en posiciones concretas del extremo de entrada de la MC-POF.
- ii. **Medidas individualizadas de las propiedades de transmisión,** tales como potencia transmitida, distribución angular de la intensidad a la salida de la fibra y respuesta

en frecuencia, de los núcleos de MC-POF. Se realizarán para distintos tipos de fibras MC-POF y distintas longitudes, para estudiar la variabilidad entre ellas.

- iii. **Experimentos de transmisión.** Comprobación experimental de la transmisión a través de varios núcleos de la fibra multinúcleo para señales NRZ.

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria del proyecto seguirá la siguiente organización.

- **Capítulo 1.** Se realiza una pequeña introducción, en la que se expone de manera general en qué consiste el trabajo a realizar.
- **Capítulo 2.** Definido como estado del arte, dónde se describen los principios teóricos utilizados para llevar a cabo el trabajo y el contexto en el que se encuentra.
- **Capítulo 3.** Se detalla el estudio de las condiciones de inyección realizado; caracterización de la fuente óptica utilizada y el estudio seguido para la selección de la fibra de vidrio inyectora.
- **Capítulo 4.** Una vez concretado el sistema de inyección, se procede al análisis de las propiedades de transmisión de los núcleos individuales de MC-POF. Además, estudiaremos el efecto de la dependencia con la longitud realizar el estudio anterior para diferentes tramos.
- **Capítulo 5.** Estudio de la transmisión a través de los núcleos individuales de MC-POF mediante el uso de pulsos NRZ.
- **Capítulo 6.** Conclusiones y líneas futuras. Reflexión sobre las conclusiones extraídas del trabajo y proyección sobre futuros trabajos.

Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan brevemente el contexto en el que se enmarca el proyecto abordando tanto los aspectos más teóricos que lo fundamentan, como otros más prácticos. Así, se presentan las características de las fibras ópticas de plástico haciendo hincapié en sus principales propiedades de transmisión. Dentro de los tipos de POF existentes, se hace reseña especial de las fibras multinúcleo, que son parte central de este trabajo. Además, se presenta de forma muy breve el sistema de inyección localizada que nos permitirá realizar la caracterización de la MC-POF a nivel de núcleos individuales. Este sistema ya se desarrolló en trabajos anteriores, si bien ha sido necesaria su puesta a punto y la determinación de la mejor configuración para proceder con el objetivo principal del trabajo.

2.1. FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

El origen de la fibra óptica como medio de transmisión se remonta alrededor de los años 60, con la llegada de fibras dieléctricas que contaban a su alrededor con un medio de menor índice de refracción. A partir de ahí, nace el prototipo de fibra óptica que se conoce hoy en día: guías de onda cilíndricas, flexibles y transparentes a través de las cuales es posible propagar una señal luminosa mediante el fenómeno de reflexión total. De esta forma, la luz se guía por el núcleo o *core* que está rodeado de otro medio de índice de refracción menor, denominado cubierta o *cladding*. Estas dos capas junto con la más externa, que recibe el nombre de revestimiento o *jacket*, forman la estructura geométrica de la fibra óptica. En la **Figura 2.1** se puede observar la sección típica de una fibra óptica de vidrio (GOF) monomodo estándar y el fenómeno de reflexión total que permite la propagación efectiva de luz a su través.

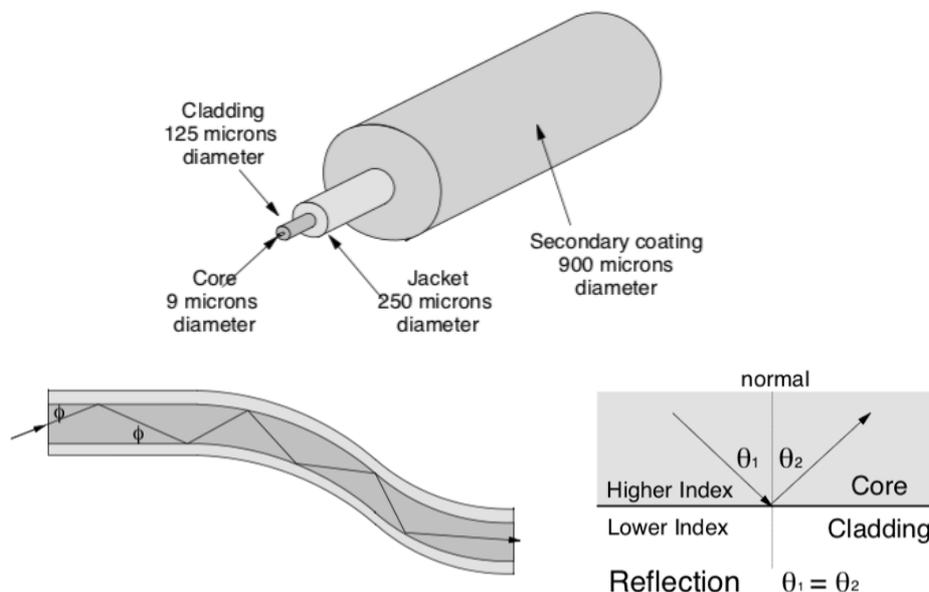


Figura 2. 1. Estructura de una fibra óptica (parte superior) y vista longitudinal con fenómeno de reflexión total a través de ella (parte inferior) [16]

En los últimos años, el desarrollo de las redes ópticas como sistemas de comunicaciones ha adquirido gran importancia ante un aumento en la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios. Es por ello que ha surgido la necesidad de evolucionar hacia nuevos sistemas de comunicaciones ópticas y nuevas tecnologías. En este sentido, los enlaces de comunicaciones basados en GOF han evolucionado muy rápidamente ajustándose al demandante escenario de ancho de banda. Por otra parte, las fibras ópticas de plástico o POF (*Polymer Optical Fiber* ó *Plastic Optical Fiber*) han quedado de alguna forma relegadas a un segundo plano, dadas sus limitaciones de atenuación y ancho de banda. Sin embargo, la implantación de la POF representa una solución atractiva en ciertos escenarios, gracias a sus ventajas adicionales como bajo coste, fácil manejabilidad y manipulación, y la posibilidad de trabajar en longitudes de onda visible. Concretamente, en 1966, el primer prototipo de fibra óptica compuesta por polimetilmetacrilato (PMMA) fue la fibra óptica de salto de índice (SI-POF) y contaba una tasa de transmisión que no superaba las decenas de Mb/s, lo cual hacía muy difícil su comercialización. Sin embargo, durante su evolución se ha conseguido obtener tasas de transmisión más elevadas, llegándose a demostrar la transmisión de hasta 5 Gb/s sobre 100 metros de SI-POF usando formatos de modulación avanzados como DMT [7]. A pesar de contar con este tipo de limitaciones que no las hacen adecuadas para todos los ámbitos, han logrado integrarse en sectores como la automoción, redes domésticas y área industrial, entre otros, constituyendo sistemas de corta distancia en los que la atenuación no llegue a significar una pérdida importante en las prestaciones del sistema [5].

Las fibras de plástico actuales se fabrican en diversos materiales plásticos, siendo las más comunes las de polimetil-metacrilato, que presenta un índice de refracción de 1.492 [8]. En cuanto a las dimensiones, también existe un número de variantes, pero las POF más habituales o POF estándar tienen un núcleo de aproximadamente 1 mm de diámetro. Sin embargo, con el objetivo de mejorar la capacidad de transmisión y ampliar las prestaciones de las POF, han ido apareciendo nuevas variantes con nuevos materiales plásticos y nuevas características geométricas. Hoy en día encontramos las fibras de salto de índice (SI-POF), que se colocan como veteranas en el sector de las POF, las fibras de gradiente de índice o índice gradual (GI-POF), en las que el índice de refracción varía en función del radio, y fibras de índice multi-escalón (MSI-POF), similares a las anteriores pero con el índice de refracción variando por capas. [5] Además, recientemente se han incorporado un tipo de fibras que, con la misma estructura y el mismo diámetro total que la POF convencional, cuenta con varios núcleos y que se conocen como fibras multinúcleo (MC-POF). En la **Tabla 2.1** se pueden observar las principales características de los tipos de fibras comentados, para longitud de onda visible. Las dos primeras son dos POF de un solo núcleo con diferente resistencia a altas temperaturas, mientras que las dos últimas son dos MC-POF también con diferente *jacket* y diferente rango de temperaturas de operación. Además, existen otras diferencias, como la apertura numérica y la atenuación, que es sensiblemente mejor en la SI-POF estándar. Cabe destacar que en la SMCK-1000P el valor para el diámetro del núcleo (1 mm) se refiere al que contiene en su interior los múltiples núcleos, por lo que cada núcleo contará con un diámetro significativamente inferior respecto a las fibras SI-POF y GI-POF, en concreto para esta fibra de 19 núcleos, el diámetro de cada uno de ellos es de 200 μm .

Fiber	GH-4001	BH-4001	SMCK-1000P	LHXE- 4001
Type	SC	SC	MC	MC
NA	0.50	0.58	0.60	0.58
Core diameter (μm)	980	980	1000	980
Attenuation @650 nm (dB/m)	0.17	0.20	0.18	n/a
Jacket diameter (mm)	2.2	2.2	2.2	1.5
Jacket material	Polyethylene (PE)	Crosslinked PE	Polyethylene (PE)	Crosslinked PE
Temperature range ($^{\circ}\text{C}$)	-55 – 85	-55 – 105	-55 – 85	-55 – 105

Tabla 2. 1. Tabla comparativa de las características de distintas POFs [17].

A continuación, se detallan las principales propiedades de transmisión de las fibras ópticas, y se describe con mayor detalle las fibras POF multinúcleo, puesto que son en las que se centra el estudio.

2.1.1. PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN

Las fibras ópticas de plástico, como se ha comentado, cuentan con múltiples ventajas sobre otros medios guiados dentro de los sistemas de comunicaciones. Las POF cuentan con mayor tamaño (200-1000 micras) y mayor apertura numérica (0.5-0.6) que las fibras ópticas de vidrio, que cuentan con 9 a 62.5 micras (según si se trata de fibras monomodo o multimodo) y apertura numérica entorno a los 0.2-0.3. [18] Sin embargo, uno de los inconvenientes que se producen al trabajar con POF es la dispersión modal, que provoca limitaciones en el ancho de banda y, por tanto, en la capacidad de transmisión. Esto se debe a que, al presentar una apertura numérica elevada, los múltiples modos que se propagan por la fibra acumulan grandes retardos entre ellos, lo que reduce el ancho de banda ofrecido por la fibra.

Entre las múltiples las propiedades con las que cuentan las fibras ópticas de plástico, es importante estudiar aquellas que las limitan como medio de transmisión. Los dos fenómenos que destacan por ello son la atenuación y la dispersión, los cuales se describen a continuación. Además, hay que destacar la influencia de las condiciones de inyección en la medida de estas propiedades [9].

- **Atenuación:** La atenuación es una de las limitaciones más importantes a tener en cuenta a la hora de determinar la distancia máxima de transmisión de un tramo de fibra. Este fenómeno se entiende como la pérdida de potencia óptica en la transmisión, y se define como el cociente entre la potencia óptica de entrada y la de salida como encontramos en la Ecuación 2.1.

$$\alpha \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

Si se habla de la atenuación que caracteriza a una fibra, se define la atenuación por unidad de longitud y depende inversamente de la distancia, tal y como se muestra en la Ecuación 2.2. [10]

$$\alpha \text{ (dB/km)} = \frac{10}{L \text{ (km)}} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

[Ecuación 2. 2]

La atenuación es originada por diversos factores, en función de la manera de perder energía encontramos la absorción, intrínseca y extrínseca, la difusión o *scattering* y la radiación, que puede darse por macrocurvaturas o microcurvaturas. Además, también existe dependencia con la longitud de onda de trabajo como se puede observar en la **Figura 2.2**.

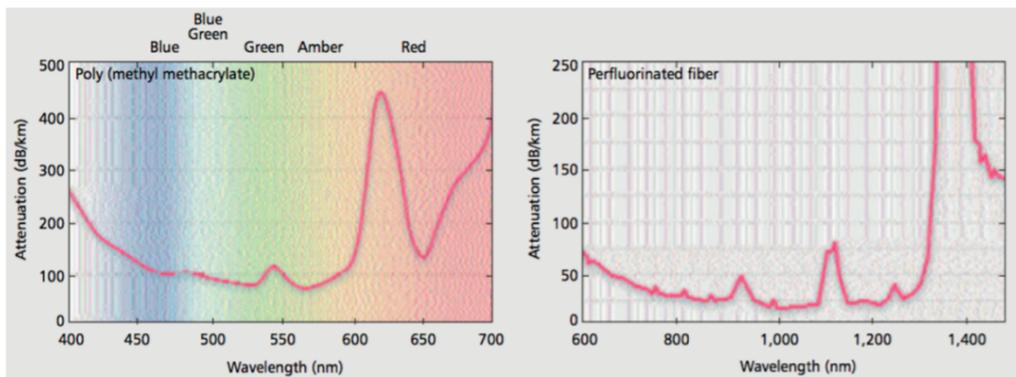


Figura 2. 2. Atenuación espectral de POF convencional compuesta por polimetil-metracrilato (izquierda) y de POF perfluorinada (derecha) [19][20].

Además de la longitud de onda, la atenuación también depende del material con el que se fabrica la fibra óptica y la propia geometría de la fibra, es decir, la atenuación varía entre los distintos tipos de POFs existentes.

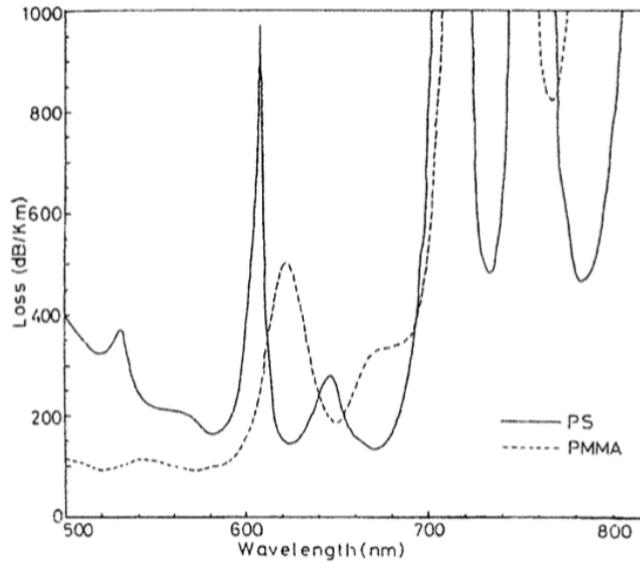


Figura 2. 3. Atenuación espectral de dos fibras ópticas fabricadas con distintos materiales: PMMA y PS [21]

En la **Figura 2.3** se puede observar las curvaturas de atenuación espectral de POF convencional de distintos materiales (polimetilmetacrilato y poliestireno) en función de la longitud de onda. En este caso, podemos observar que ambas presentan puntos de máxima atenuación en longitudes de onda de trabajo comunes.

- **Dispersión:** La dispersión aparece como consecuencia de la propagación de múltiples componentes como modos, longitudes de onda o polarizaciones en la fibra. Se entiende como el retardo que sufren los componentes de la potencia óptica al viajar a distintas velocidades de propagación a través de la fibra óptica [10]. El efecto de este fenómeno se traduce en el ensanchamiento temporal del pulso, lo que puede llegar a producir solapamientos entre pulsos consecutivos y, como consecuencia, una degradación en la tasa de transmisión. Existen distintas contribuciones a la dispersión que puede experimentar una señal óptica al transmitirse por una fibra según el fenómeno que origina el ensanchamiento temporal: dispersión modal, dispersión cromática, dispersión por polarización,... En la **Figura 2.4** se representa un ejemplo de lo que ocurriría al pulso transmitido a través de la fibra bajo el efecto de dispersión.

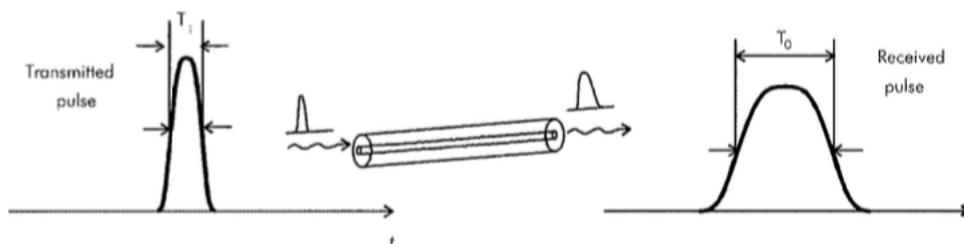


Figura 2. 4. Efecto de dispersión sobre un pulso transmitido en POF [21].

La dispersión que aparece en la POF se debe a la dispersión modal, exclusiva de fibras multimodo. Este efecto produce retardos entre los distintos modos que se propagan por la fibra, de manera que al producirse un ensanchamiento de los pulsos transmitidos el ancho de banda disminuye. Por lo que, a mayor dispersión modal menor ancho de banda disponible en transmisión. Entre los distintos tipos de fibras ópticas de plástico, las GI-POFs son las que presentan menores valores de dispersión, consiguiendo mejores tasas de transmisión. En la **Figura 2.5** se ilustran gráficamente el producto del ancho de banda con la distancia para diferentes tipos de fibras.

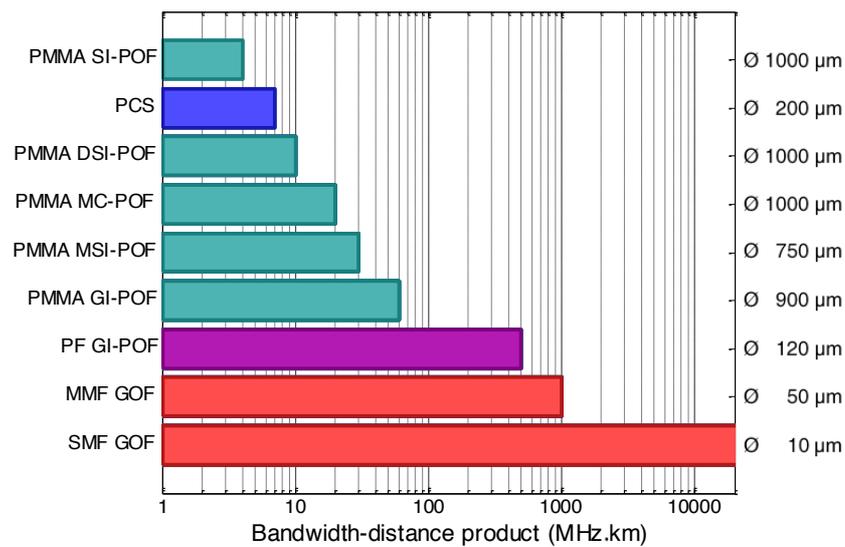


Figura 2. 5. Producto de ancho de banda y distancia para distintas fibras ópticas [22].

Las mayores diferencias se encuentran entre las fibras PMMA SI-POF con unos 4 MHz.km y las SMF-GOF, cuyo límite sobrepasa el rango fijado. Si comparamos los resultados para fibras POF, la diferencia más notable se da, de nuevo, entre la PMMA SI-POF y la PF GI-POF, que alcanza el ancho de banda de 600 MHz.km.

2.1.2.FIBRAS MULTINUCLEO (MC-POF)

Con el aumento de la demanda del ancho de banda surgió la necesidad de estudiar una mejora de la eficiencia espectral que se conseguía con las POF convencionales, así como una mejora de las prestaciones que proporcionaban. Por esta razón, se comienza a investigar la transmisión sobre POF con distintos formatos de modulación que garanticen un mayor ancho de banda. En este contexto surgen las fibras multinúcleo, presentándose como una solución atractiva para superar la capacidad de transmisión mediante la introducción de técnicas de multiplexación espacial [11]. Las fibras multinúcleo, o MC-POF, cuentan con dimensiones globales similares a la POF convencional, con la peculiaridad de incorporar varios núcleos en una misma área de revestimiento como se muestra en la **Figura 2.6**.

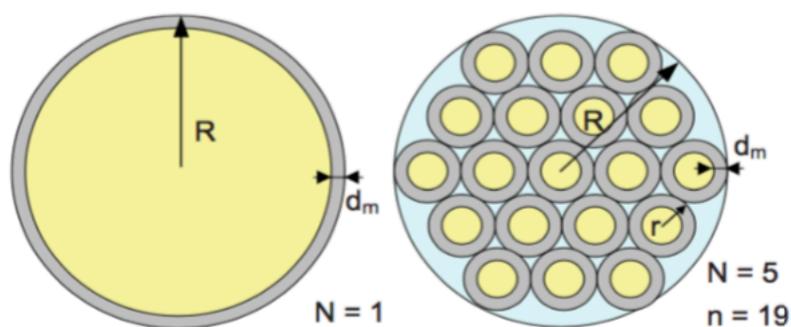


Figura 2. 6. Sección de POF de un solo núcleo (izquierda) y MC-POF de 13 y 19 núcleos (derecha) [1]

Además de las dimensiones del diámetro exterior, también mantienen ventajas como la sencilla manejabilidad y el acoplamiento. Sin embargo, presentan características adicionales que las hacen más interesantes para el estudio de sistemas de alta capacidad, frente a otros tipos de POF comentados con anterioridad. Entre ellas se destacan:

- **Baja sensibilidad a curvaturas:** La dependencia entre las pérdidas por curvaturas y el radio de la fibra, viene dada por el cociente entre el radio de la curvatura y el radio del núcleo por el que se transmite. [12] Por lo tanto, al contar con un radio del núcleo menor en las MC-POF, el cociente entre ambos radios será mayor y como consecuencia, las pérdidas por curvaturas son menores respecto a POF convencionales, tal y como se observa en la **Figura 2.7**.

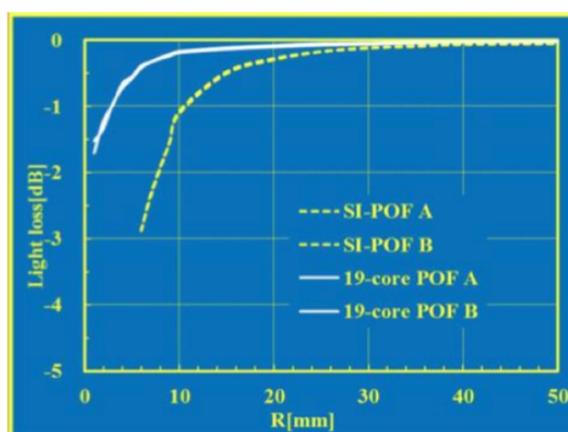


Figura 2. 7. Pérdidas por curvaturas para distintos tipos de POF [23].

- **Mejora en el ancho de banda y en la capacidad de transmisión:** Gracias a la presencia de varios núcleos se puede aumentar la capacidad de datos a transmitir aplicando técnicas de multiplexación por división espacial (SDM). De manera que, cada uno de los núcleos constituye un canal de comunicación por el que transmitir datos en paralelo. Un esquema de cómo se llevaría a cabo la multiplexación espacial en este tipo de fibras se ilustra en la **Figura 2.8**.

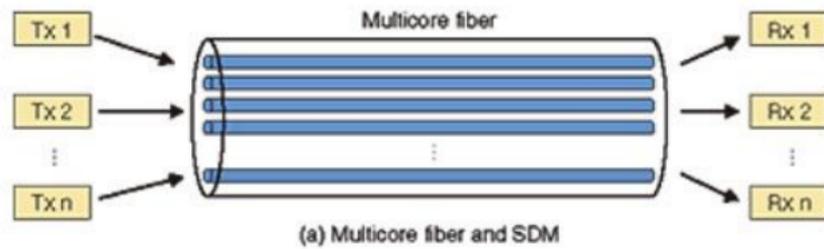


Figura 2. 8. Multiplexación espacial en MC-POF [24].

Gracias a estas ventajas las MC-POF se han hecho un hueco entre las POF, planteándose como una solución con potencial para futuros sistemas de mayor capacidad de transmisión en conjunto con otras tecnologías emergentes.

2.2. SISTEMA DE INYECCIÓN LOCALIZADA

Para poder conocer las propiedades de transmisión de las fibras de plástico multinúcleo, es necesario disponer de un sistema de inyección localizada que permita realizar medidas a nivel de núcleo individual.

En trabajos anteriores, se ha realizado un montaje experimental que permite controlar la inyección de luz de una fibra inyectora a una fibra receptora mediante un sistema controlado por ordenador y que está basado en 6 motores micrométricos que permiten cambiar la posición relativa de la fibra inyectora y la fibra a analizar, además de sendas cámaras en los extremos de inyección y de salida de dicha fibra, como se puede apreciar en la **Figura 2.9**.

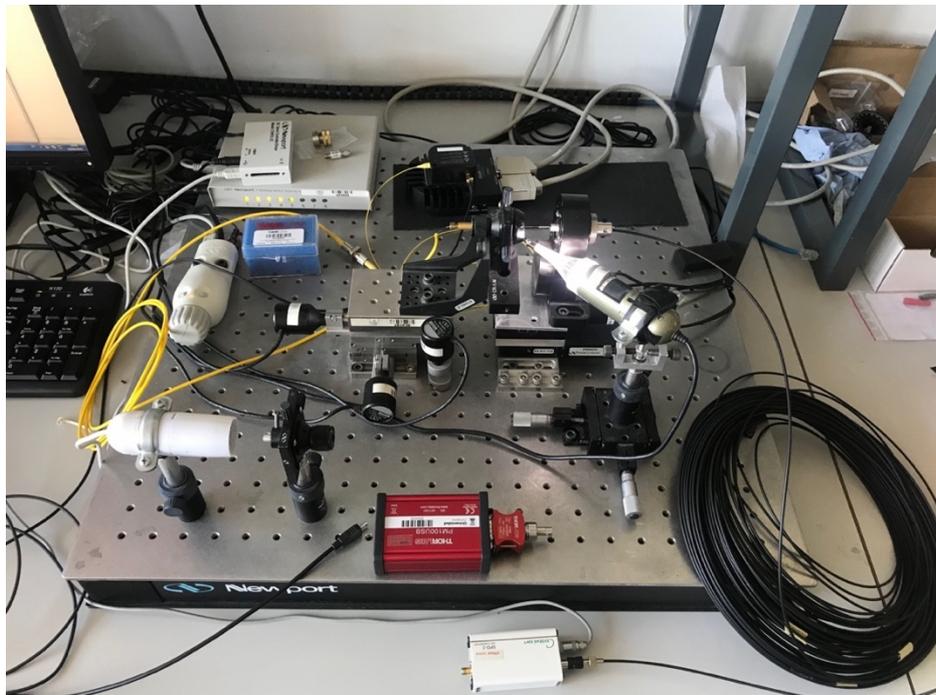


Figura 2. 9. Sistema de inyección localizada utilizado en el laboratorio de POF de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

En concreto, la fibra inyectora se conecta directamente al láser y su posición se controla utilizando tres etapas lineales NSA-12 montadas sobre una base lineal XYZ-LH de Newport. Por otro lado, también se permite ajustar la posición relativa a lo largo de las tres coordenadas angulares: *Roll*, *Pitch* y *Yaw*. Las etapas angulares correspondientes a estos grados de libertad son NSR1, M-GON65-L y PR50CC respectivamente [13]. Para facilitar el ajuste del enfrentamiento entre las dos fibras, el sistema incorpora una cámara CCD (Dino-Lite Pro, 1.3 Mpixel, 30 fps). Además, también se obtiene una visión del extremo de salida de la fibra POF receptora mediante una segunda cámara, Digimicro (1.3 Mpixel, hasta 200X de aumento) que nos permite obtener el campo cercano (NFP, *Near Field Pattern*) a la salida de dicha fibra.

En la **Figura 2.10** se muestran las imágenes obtenidas por cada una de estas cámaras, gracias a las cuales se han podido realizar de una manera sencilla la inyección en la MC-POF, así como la identificación cada uno de los núcleos de esta.

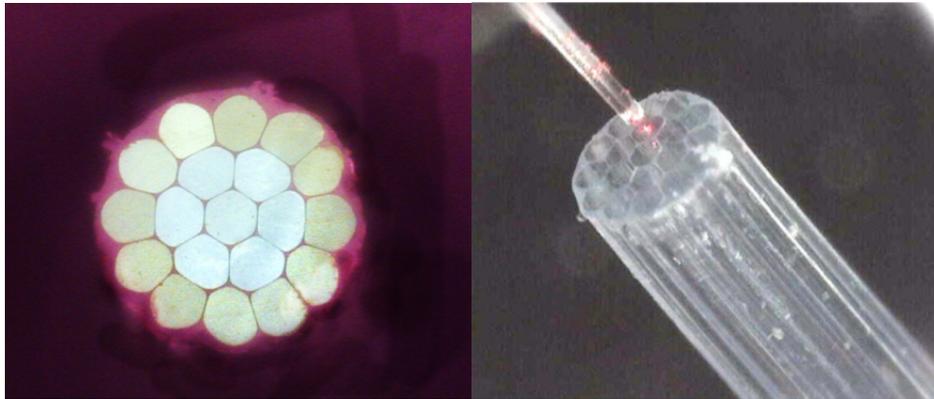


Figura 2. 10. Imágenes tomadas por las cámaras del sistema de alineamiento: extremos de salida MC-POF (izquierda) y extremo de inyección (derecha).

El protocolo seguido para llevar a cabo las medidas de caracterización a nivel individual de los núcleos de MC-POF se puede dividir en los siguientes pasos:

- 1- Se hace una primera alineación entre la fibra inyectora y la fibra a caracterizar usando el control por ordenador de los motores y con apoyo de la imagen de ambas fibras en el extremo de inyección (imagen derecha de la **Figura 2.10**)
- 2- Usando una intensidad de corriente baja para que la potencia emitida por el láser sea pequeña y no se sature la cámara en el extremo receptor, se observa el campo cercano y se hace el ajuste fino de la alineación entre fibras para inyectar en el núcleo de interés.
- 3- Una vez la inyección está en la posición deseada, se aumenta la intensidad de polarización del láser hasta el nivel deseado y se conectoriza el extremo de salida de la MC-POF para realizar la medida que se desee (potencia óptica, respuesta en frecuencia, campo lejano...)

En el proceso de medida, ha sido muy importante tener convenientemente identificados los núcleos que forman parte de la MC-POF. Para ello, se ha tomado una imagen de campo cercano

de forma previa a la realización de medidas y se ha etiquetado cada núcleo mediante un número (del 1 al 19). En las medidas se ha seguido el orden ascendente: se ha comenzado por el núcleo central, seguido de los 6 núcleos de la primera corona y, por último, los 12 restantes de la corona exterior, como se muestra en la **Figura 2.11**.

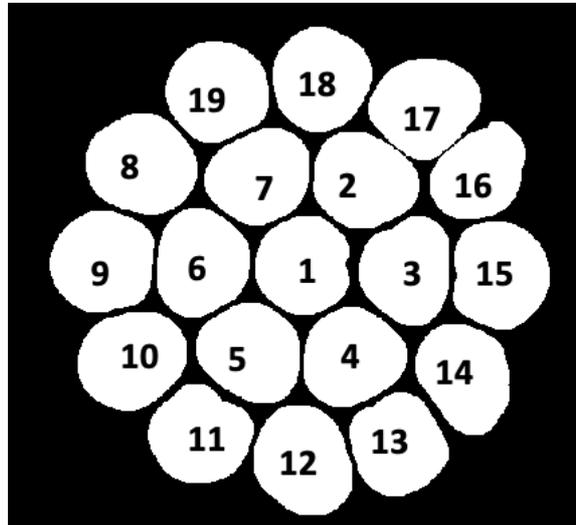


Figura 2. 11. Etiquetado de los núcleos seguido para la fibra SMCK-1000P.

Capítulo 3 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE INYECCIÓN

Como se ha comentado al explicar el montaje físico, la fuente óptica que vamos a utilizar para llevar a cabo la inyección es un diodo láser. Este elemento, que se sitúa dentro de los componentes de la parte óptica del montaje, adquiere una gran importancia en el mismo; por lo tanto, es fundamental realizar una correcta caracterización que nos permita conocer con más detalle las propiedades de dicha fuente óptica. En nuestro caso, vamos a trabajar con un diodo láser con longitud de onda de emisión en 658 nm, se trata del modelo LP660-SF40, del fabricante Thorlabs. Éste viene conectorizado mediante un rabillo de fibra monomodo de visible, lo que nos permitirá realizar una inyección de forma localizada. El láser en cuestión presenta una potencia nominal de emisión de 40 mW, así como una corriente de operación máxima de 135 mA; parámetros a tener en cuenta para elegir su punto de operación. Para alimentar al láser hacemos uso de la base de polarización LDM9LP, de Thorlabs. En el **Anexo I.1** se adjuntan todas las hojas de características tanto del láser como de la base de polarización y control de temperatura.

El estudio de las condiciones de inyección lo desglosaremos en dos partes. En primer lugar, caracterizaremos la fuente láser con la que se trabajará, obteniendo las curvas de Intensidad-Potencia de la misma en función de la temperatura de trabajo. Estas medidas nos permiten obtener las propiedades básicas de emisión del diodo láser; determinamos tanto la intensidad umbral como la intensidad de corriente que es necesaria aplicar para obtener un determinado nivel de potencia óptica a la salida. Por otro lado, también estudiaremos la respuesta en frecuencia de un enlace completo que use como transmisor esta fuente óptica, como canal un tramo de fibra corto, y como receptor uno de los disponibles en el laboratorio. Esta medida nos permitirá conocer las características de ancho de banda de transmisor y receptor, lo que nos servirá de referencia en las medidas que posteriormente hagamos con las fibras de interés.

Fijada la fuente óptica y su punto de operación, será necesario determinar la mejor fibra óptica para realizar la inyección. Para ello se ha realizado un estudio que nos permitirá seleccionar la fibra inyectora mediante la comparación de varios tipos de fibras de vidrio que presenten distintas características (multimodo estándar, monomodo estándar y monomodo de visible). El objetivo de esta segunda parte será encontrar la fibra óptica que nos garantice mejores prestaciones en cuanto a capacidad de transmisión, es decir, aquella que nos permita obtener medidas en un rango amplio de amplitudes y con la mejor repetitividad posible. Para ello, por un lado, estudiaremos la distribución espacial de la potencia óptica a la entrada de la fibra multinúcleo, realizando las medidas a la salida de cada una de las fibras ópticas de vidrio variando la intensidad de corriente y la temperatura de trabajo del láser. Por otro lado, también compararemos las fibras inyectoras analizando su influencia sobre la respuesta frecuencial del sistema de transmisión sobre MC-POF.

3.1. CONFIGURACIÓN FUENTE ÓPTICA

Como se ha comentado anteriormente, la fuente óptica con la que vamos a trabajar es un diodo láser en color rojo (LP660-SF40, de Thorlabs) montado sobre la base de polarización LDM9LP que nos permite controlar su alimentación y que, a su vez, lleva incorporado un controlador de temperatura que permite realizar variaciones en el rango de 0 a 50 °C. La peculiaridad de esta fuente es que viene conectorizada mediante un rabillo de fibra monomodo de visible.

3.1.1. MEDIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA

El objetivo de la caracterización y configuración de la fuente óptica es conocer en detalle las propiedades que presenta, de manera que se facilite la selección del modo de operación óptimo sin sobrepasar los valores límite. Para ello, determinamos en primer lugar la curva de potencia óptica emitida frente a la intensidad de corriente eléctrica de polarización (curvas Intensidad-Potencia) para distintas temperaturas. Estas medidas nos permitirán conocer la intensidad umbral a partir de la cual comienza el régimen de emisión estimulada y la pendiente de eficiencia. Además, también permiten determinar el rango de intensidades de polarización más adecuado para realizar la modulación de la fuente, asegurando que ésta presenta un comportamiento lineal y evitando cualquier distorsión en el proceso de modulación.

Para medir la potencia a emitida por el láser se ha conectado la salida de su rabillo de fibra de manera directa a un medidor de potencia que dispone de un fotodetector en el rango visible, dado que el nivel de potencia a la salida no llegaba a saturarlo. El control de la base de polarización sobre la que se monta el láser se realiza con el controlador Thorlabs ITC 502, con el que se controla tanto la intensidad de corriente de polarización, como el control de la temperatura de operación. Para obtener las curvas de Intensidad-Potencia se ha realizado un barrido de la intensidad de corriente desde 0 hasta 135 mA, con pasos de 10 mA en la zona de emisión espontánea, pasos de 2 mA en la zona cercana al umbral y pasos de 4 mA en la zona lineal. Además, para estudiar el efecto de la temperatura sobre estas curvas y determinar las mejores condiciones de operación de la fuente óptica, esta medida se ha realizado para un total de cuatro temperaturas (25 °C, 30 °C, 35 °C y 40 °C). Dado que la base de polarización del láser, LDM9LP, es controlada por un termistor, se realiza como paso previo la conversión de resistencia a temperatura a partir de la curva del termistor de resistencia vs temperatura, que podemos encontrar en el **Anexo I.1**. En la **Tabla 3.1** observamos la correspondencia entre temperatura y resistencia.

RESISTENCIA (K Ω)	TEMPERATURA (°C)
10	25
7.93	30
6.29	35
5	40

Tabla 3. 1. Conversión resistencia a temperatura del termistor de la base de polarización LDM9LP.

La **Figura 3.1** muestra los resultados obtenidos, indicando el eje vertical la potencia a la salida del láser en mW y el eje horizontal la intensidad de corriente con la que se alimenta el láser. Las distintas curvas representan las medidas tomadas para distintas temperaturas.

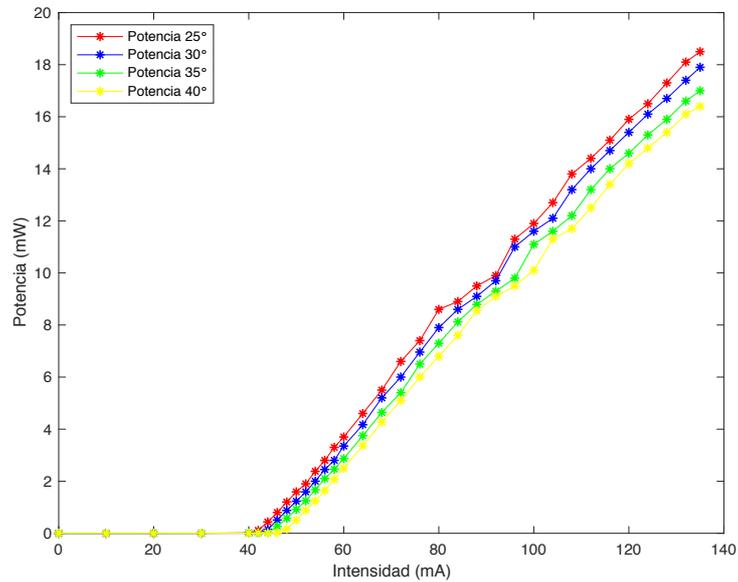


Figura 3. 1. Curva Intensidad-Potencia fuente óptica en función de la temperatura.

Como se puede observar, un aumento en la temperatura de trabajo supone un ligero aumento del valor de intensidad umbral, a la vez que una disminución en pendiente de eficiencia. En la **Tabla 3.2** se recogen los valores numéricos concretos que demuestran esta observación.

Temperatura (°C)	Intensidad Umbral (mA)
25	40
30	41.5
35	42
40	44

Tabla 3. 2. Intensidad umbral en función de la temperatura de operación

Experimentalmente, la intensidad umbral de la fuente óptica oscila en torno a valores de 40-44 mA. Con los resultados obtenidos se decide que una buena temperatura de operación serían 25°C, debido a la mejora de potencia sobre las demás temperaturas.

3.1.2. MEDIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ANCHO DE BANDA

Además de la característica de potencia, es importante conocer las propiedades frecuenciales de la fuente óptica, que pueden ser determinantes en el ancho de banda del enlace de comunicaciones. Para realizar esta caracterización en el dominio de la frecuencia se usa la entrada de modulación RF con la que cuenta la base de polarización LDM9LP sobre la que se monta el láser.

En concreto, es necesario establecer un enlace completo de comunicaciones. El enlace tiene como transmisor el láser con rabillo montado sobre su base de polarización, como canal un tramo corto de fibra óptica y como receptor un dispositivo comercializado por Graviton y específicamente diseñado para el rango visible: SPD-2 650 nm. Además, para evitar que sature el receptor se introduce un atenuador variable entre el rabillo del láser y la fibra corta en caso de que sea necesario. Se ha estudiado la respuesta frecuencial considerando una fibra de vidrio monomodo estándar y también una fibra óptica de plástico estándar (con un solo núcleo) tras la fibra de vidrio mediante un conector. De cualquier manera, siempre y cuando la transmisión se realice a través de una fibra suficientemente corta, la medida de la respuesta frecuencial se corresponderá a la asociada a transmisor y receptor, siendo la contribución de la fibra despreciable.

Para realizar la medida se usa un analizador de redes vectorial (VNA, *Vectorial Network Analyzer*), cuya salida se usa para modular la fuente óptica, recogiendo en su puerto de entrada la señal eléctrica a la salida del receptor. El VNA utilizado es el modelo E5071C de Agilent, que tiene un rango de trabajo hasta 4.5 GHz. La medida del parámetro de transmisión (S_{21}) nos permitirá obtener la respuesta frecuencial del sistema bajo test. A continuación, se detalla el esquema del sistema experimental implementado para obtener dicha respuesta:

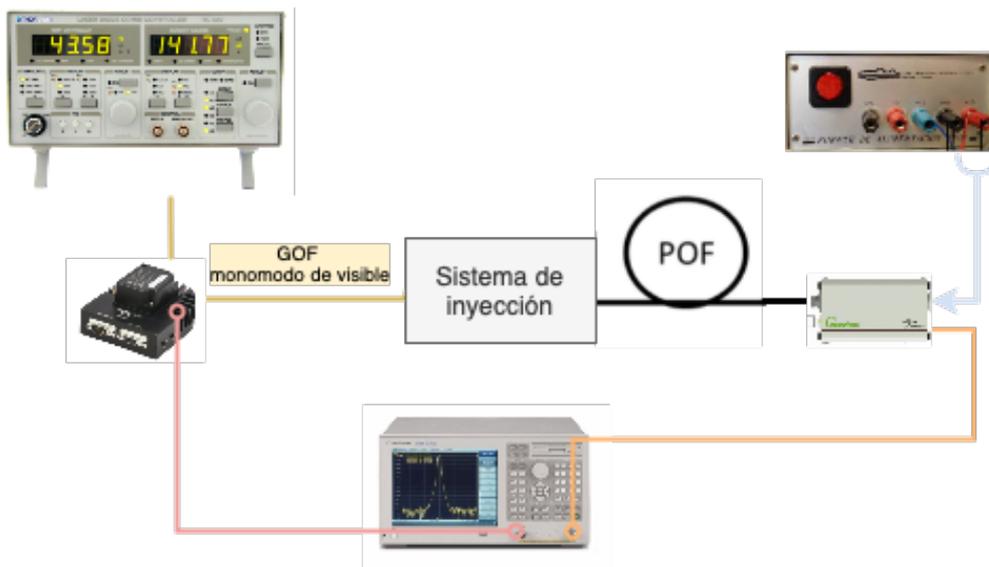


Figura 3. 2. Esquema del montaje experimental para realizar las medidas de respuesta en frecuencia.

Se han realizado varias medidas de respuesta en frecuencia variando la intensidad de corriente de polarización con la que se trabaja (60, 80, 100, 120 y 140 mA). En cuanto a la variación con la temperatura, se comprobó en un estudio anterior [14] que la respuesta frecuencial experimenta cambios notables, de forma que las mejores prestaciones se obtienen para 25 °C, por lo que se decide fijar la temperatura a ese valor.

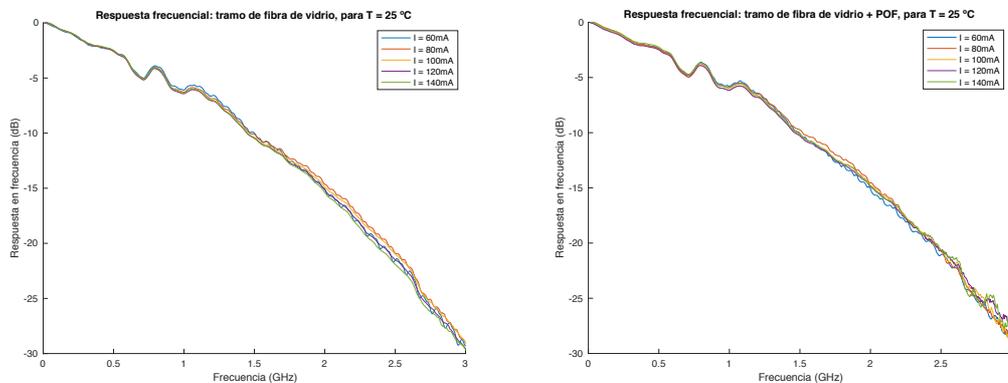


Figura 3. 3. Respuesta frecuencial tramo corto de GOF (izquierda) y de tramo de GOF+POF (derecha) en función de la corriente de polarización.

Como se observa en la **Figura 3.3**, en la que se normalizan todas las medidas respecto a su propio máximo, los cambios que experimenta la respuesta en frecuencia al variar la intensidad de corriente de polarización del láser no son significativos, ya que todas siguen el mismo patrón. Las medidas de respuesta en frecuencia realizadas con la fibra corta de vidrio SMF y la fibra corta POF estándar son idénticas, lo que demuestra que, dada la escasa longitud de la fibra, sus características no son relevante en la toma de estas medidas. En ambas gráficas se observan una forma similar, con unas oscilaciones en el rango de 0.5 a 1 GHz. Este tipo de comportamiento es el mismo que ya se obtuvo anteriormente [14]. Sin embargo, no es el comportamiento esperado ya que, teóricamente, la respuesta frecuencial de fuentes ópticas láser mejora al aumentar el número de portadores en la inyección, es decir, al aumentar la corriente de polarización tal y como se muestra en la **Figura 3.4**.

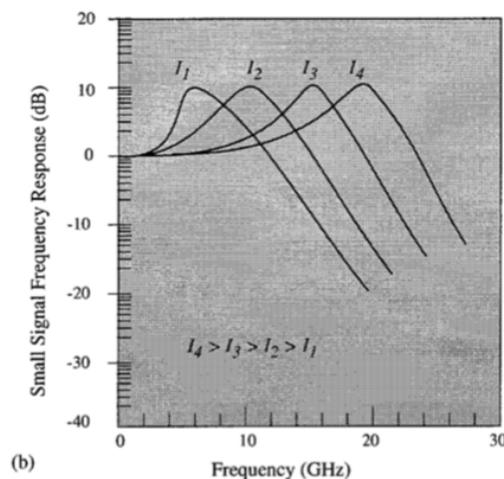


Figura 3. 4. Respuesta frecuencial teórica, en función de la corriente de polarización, de un láser [15].

Tras realizar la caracterización básica de la fuente óptica, hemos podido determinar sus características de potencia frente a corriente de polarización, obteniendo una corriente umbral en torno a 40 mA y una corriente máxima de 135 mA, en vista de lo cual consideramos que para garantizar el trabajo en la zona lineal, la intensidad de polarización del láser debería estar comprendida en el rango 65 a 80 mA. Además, gracias a la caracterización espectral hemos comprobado que el ancho de banda a -3 dB se mantiene invariable ante cambios en parámetros como es la intensidad de corriente.

3.2. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA FIBRA INYECTORA

El estudio y configuración óptima del sistema de inyección localizada incluye tanto los parámetros de operación del transmisor (temperatura, intensidad de polarización del láser), como los aspectos referentes a la fibra con la que se realizará la inyección sobre la MC-POF. Así pues, como segunda fase dentro del proceso de optimización del sistema de inyección localizada, se ha realizado un estudio detallado que nos permita seleccionar la fibra de vidrio más adecuada para la inyección. De entre las fibras ópticas de vidrio disponibles en el laboratorio se han preseleccionado tres fibras de vidrio para realizar el estudio, considerándose que podían ser buenas candidatas. Las fibras con las que hemos trabajado han sido una fibra multimodo estándar (MMF), una fibra monomodo estándar (SMF) y una fibra monomodo de visible. Sobre esta última, cabe destacar que es la misma fibra con la que se encuentra conectorizado el láser del sistema (fibra monomodo de visible SM600, Thorlabs). Esta fibra cuenta con una apertura numérica baja (0.1 – 0.14) y un núcleo pequeño (50% inferior al de una SMF estándar), sus características completas se encuentran incluidas en el Anexo I.

La fibra inyectora más adecuada será aquella que nos permita obtener medidas en un rango amplio de amplitudes y con la mejor repetitividad posible. Por ello, va a ser importante la potencia disponible en la inyección, su distribución espacial y la variabilidad de las medidas. En concreto, se han realizado medidas de la distribución angular de intensidad óptica a la salida de cada una de las fibras de vidrio que nos permitirán estimar la potencia disponible en la inyección, así como sus características espaciales. Por otra parte, se ha evaluado la influencia de realizar la inyección con cada una de ellas sobre la medida de la respuesta frecuencial mediante un enlace de comunicaciones que use como medio de transmisión uno de los núcleos de la MC-POF.

3.2.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INTENSIDAD ÓPTICA

Una de las desventajas de trabajar con fibras ópticas de plástico es su marcado comportamiento multimodal, permitiendo la propagación de millones de modos, que están asociados a los diferentes ángulos de propagación. En consecuencia, las POFs tienen un ancho de banda limitado por la fuerte dispersión modal existente. Además, los modos propagados a través de la fibra experimentan acoplo modal, de forma que se produce transferencia de potencia entre ellos. Es por ello, que cuando se trabaja con fibras ópticas de plástico, es necesario un buen conocimiento de las características espaciales de la luz en los distintos puntos del enlace de comunicaciones. En concreto, dado que la distribución de intensidad óptica en las fibras ópticas de plástico se ve fuertemente afectada por las condiciones de inyección que fija la distribución espacial inicial, hemos obtenido las características espaciales de la luz a la salida de cada fibra inyectora.

Para llevar a cabo este estudio se han tomado medidas de campo lejano (FFP, *Far Field Pattern*) para tramos cortos de las tres fibras seleccionadas. Las medidas de campo lejano se realizan mediante un montaje específico consistente en la proyección de la luz a la salida de la fibra sobre una pantalla a una distancia considerable y la captura de dicha imagen mediante una cámara, tal y como se muestra en la **Figura 3.5** [26]. A partir de estas imágenes obtenemos el perfil radial, considerando que existe simetría rotacional, y el EAF (*Encircled Angular Flux*), que se define como el cociente entre el flujo de radiación para un ángulo de cono dado y el flujo total. La forma del patrón de campo lejano está determinada por la distribución modal de la fibra que depende de características como su longitud, condiciones de inyección de la luz a la misma y acoplo modal.

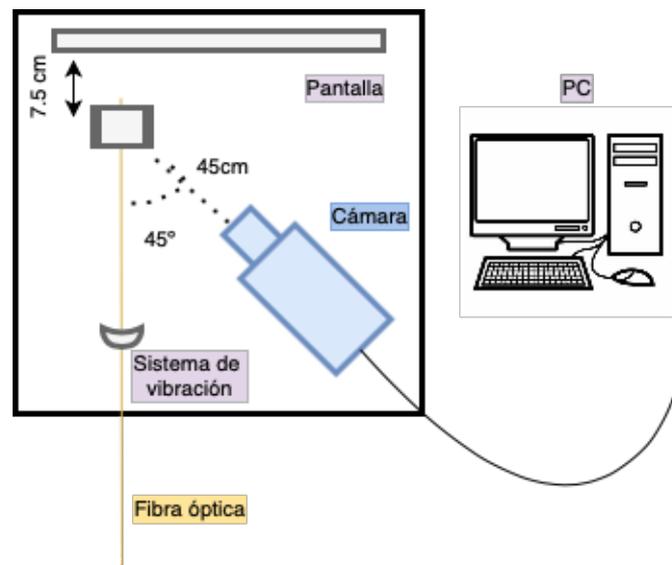


Figura 3. 5. Esquemático del montaje experimental para las medidas de distribución espacial.

El sistema utilizado para medir patrones de campo lejano consiste en una caja negra sellada con un pequeño orificio, por el que se introduce la fibra, de manera que la única luz que entre sea la de la salida de la fibra. Además, podemos seleccionar y fijar la distancia a la que queremos colocar el extremo de la fibra respecto de la pantalla sobre la que se proyecta la salida de la luz. Además, el montaje incorpora un sistema de vibración que reduce el ruido de *Speckle*. En nuestro caso, la fibra se coloca entre 5 y 10 cm y la cámara captura la imagen con una inclinación de 45° respecto a la fibra. El sistema es controlado por un software que nos permite realizar de manera automática la captación y el análisis de imágenes de la distribución de campo lejano, desarrollado en un trabajo anterior [25]. Mediante este software, podemos ajustar parámetros como el número de imágenes a captar, tiempo de exposición o el control de la cámara, entre otros.

Se han realizado 15 medidas de la distribución de intensidad para cada una de las fibras inyectoras seleccionadas. Como condiciones estándar de operación del láser se han considerado valores de temperatura de 25 °C y una intensidad de corriente de polarización de 80 mA. Además, a pesar de que ya se realizó en trabajos anteriores el estudio de la influencia de la temperatura y la intensidad de corriente sobre las características espaciales de la luz inyectada a la fibra, se han realizado medidas considerando varios valores de intensidad de corriente (80,

100, 130 mA) manteniendo fija la temperatura a su valor estándar. Por otro lado, se ha analizado el efecto de variar la temperatura de operación (25 °C, 30 °C ,y 35 °C) fijando la corriente a 80mA.

En la **Figura 3.6** se representan las distribuciones espaciales de luz a la salida de las fibras frente al ángulo de salida en términos de perfil radial del patrón de campo lejano (izquierda), que nos permite ver el nivel potencia que llega en cada caso, y las distribuciones espaciales de luz a la salida en términos de EAF (derecha), que nos permite comparar las distribuciones espaciales normalizadas. Dado que el rabillo de fibra monomodo de visible con el que se conecta la fuente láser presenta una baja apertura numérica, podemos deducir de antemano que la inyección de la luz en cada una de las fibras a estudiar será muy focalizada y, por lo tanto, la distribución espacial será estrecha.

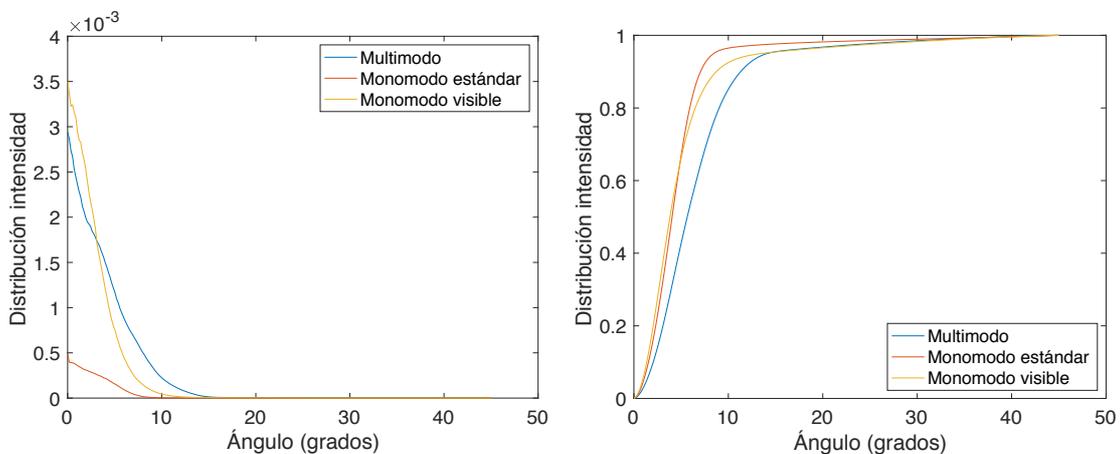


Figura 3. 6. Distribución de intensidad y EAF a la salida de las 3 fibras de vidrio inyectoras del estudio.

La comparación de las características espaciales de la luz mostradas en las gráficas revela una distribución más estrecha, y que por tanto permitirá hacer una inyección a la MC-POF más localizada, para las dos fibras monomodo frente a la fibra multimodo. Más concretamente, ambas fibras monomodo presentan EAFs a su salida muy similares, de anchura a media altura en torno a 4°, frente a los cerca de 6° de la fibra multimodo. También se puede observar una cierta diferencia entre el nivel de potencia recibido con las fibras monomodo y el de la fibra multimodo, debido a que pasamos de un tramo de fibra monomodo a uno de multimodo de mayor diámetro y con propiedades de transmisión diferentes. Esta comparativa se cuantifica en la **Tabla 3.3**, que recoge las anchuras angulares a media altura de dicha EAF para cada fibra junto con la diferencia de potencia óptica respecto al mayor valor calculada a partir de las medidas de FFP.

	SMF estándar	MMF estándar	SMF visible
Anchura NA al 50% (°)	4.1699	5.7336	3.9961
ΔP_{out} (dB)	-10.2	0.0	-2.0

Tabla 3. 3. Anchuras a media altura de EAF y potencia a la salida de las fibras inyectoras.

Para estudiar más en detalle la dependencia entre el punto de operación del láser (intensidad de corriente y temperatura) y la distribución espacial de intensidad a la salida de las fibras inyectoras, se han medido las características espaciales para distintas configuraciones de la fuente óptica en el caso de realizar la inyección con fibra monomodo de visible. En la **Figura 3.7** se representan los resultados obtenidos para el perfil radial (izquierda) y el EAF (derecha) variando la intensidad de corriente de polarización, y en la **Figura 3.8** la temperatura de trabajo del láser.

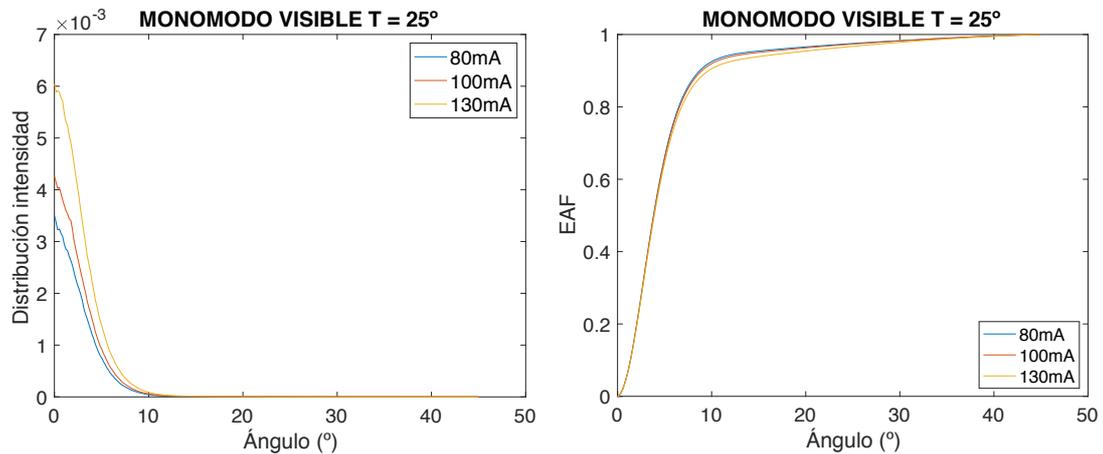


Figura 3. 7. Distribución de intensidad y EAF de la fibra monomodo de visible en función de la corriente de polarización

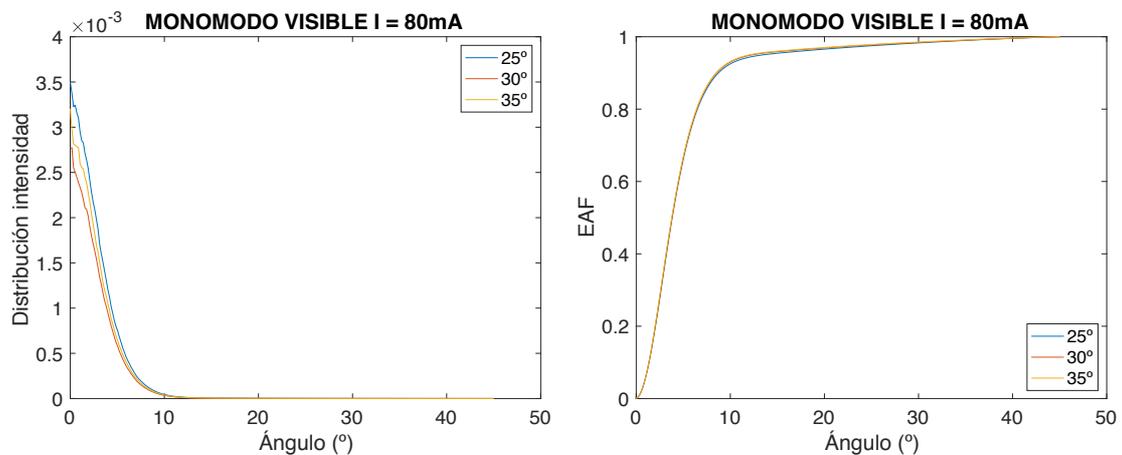


Figura 3. 8. Distribución de intensidad y EAF de la fibra monomodo de visible en función de la temperatura de operación.

Como se puede observar, y como ya se había comprobado en estudios anteriores, la influencia con la temperatura y la intensidad de corriente de polarización no es significativa, de manera que la distribución espacial de intensidad de corriente queda inalterada ante variaciones de estos parámetros de operación. Tampoco se puede determinar que los cambios sean más notables debidos a variaciones en la intensidad de corriente de polarización que a la variación de temperatura.

Por lo general, los resultados obtenidos de potencia y distribución espacial no son concluyentes en cuanto a la selección de la fibra más adecuada, ya que, si bien se observa que la inyección será más localizada en el caso de utilizar cualquiera de las fibras monomodo, la fibra multimodo es la que presenta una mayor potencia a su salida. A continuación, se estudia también el efecto de las diferentes fibras inyectoras consideradas sobre la medida de la respuesta frecuencial.

3.2.2. EFECTO SOBRE LA RESPUESTA FRECUENCIAL

Para analizar el efecto de las características de inyección sobre la medida de la respuesta frecuencial del sistema de transmisión, se han realizado medidas de respuesta en frecuencia de un enlace de comunicaciones completo cuyo canal de transmisión es uno de los núcleos de la MC-POF mediante la inyección localizada a través de las tres fibras candidatas. Se han considerado 2 longitudes de MC-POF distintas (10 y 84 metros) para poder conocer el efecto sobre fibras cortas y largas. Para cada una de las fibras, se ha realizado la inyección por 3 núcleos: núcleo central (N1), un núcleo de la primera corona (N2) y un núcleo de la segunda corona (N8), según la nomenclatura previamente establecida. Las medidas se han realizado usando un analizador de redes vectorial (VNA) y como receptor el SPD-2 de Graviton Inc., tal y como se mostró en el esquema del montaje de la **Figura 3.2**.

Las medidas se han realizado fijando la intensidad de corriente de polarización a 80 mA y la temperatura de operación a 25 °C. Además, se ha seleccionado una potencia de la señal RF que genera el VNA y se usa para modular el láser de 10 dBm, lo que nos permite trabajar dentro del rango lineal de la fuente con un nivel alto de señal que nos proporcionará una buena relación señal a ruido en las medidas, una vez se ha comprobado que no se produce saturación del receptor.

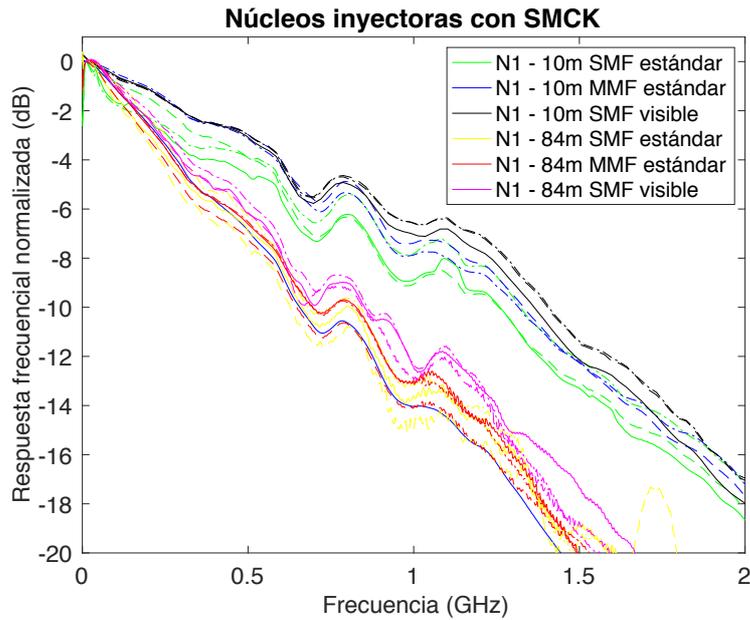


Figura 3. 9. Respuesta frecuencial normalizada para distintas fibras inyectoras y las dos longitudes consideradas de MC-POF.

En la **Figura 3.9** se representan todas las medidas de respuesta en frecuencia normalizadas para las tres fibras inyectoras de las que se dispone y las dos longitudes consideradas (10 y 84 metros), las cuales han sido realizadas para un núcleo de cada uno de los sectores de la MC-POF (núcleo central, núcleo 2 y núcleo 8). Aparentemente, la diferencia entre las respuestas frecuenciales para cada fibra inyectora no es significativa, obteniendo comportamientos similares para todas ellas. Por otro lado, como podía deducirse de antemano, ante un aumento en la longitud de la fibra la respuesta frecuencial cae más rápido, reduciéndose el ancho de banda de transmisión.

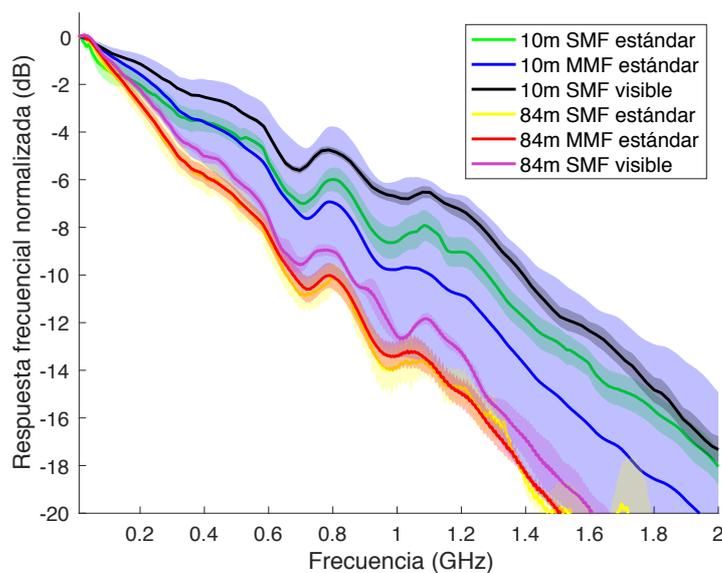


Figura 3. 10. Media y desviación estándar de la respuesta frecuencial normalizada para distintas fibras inyectoras y las dos longitudes consideradas de MC-POF.

Por otro lado, otra manera de representar y entender los resultados obtenidos es realizando el promedio y la desviación típica de la respuesta en frecuencia para los tres núcleos considerados, en función de las distintas fibras inyectoras disponibles y las dos longitudes de MC-POF, como podemos observar en la **Figura 3.10**.

Si bien en la **Figura 3.9** se representa un ejemplo de medida, se han tomado varias para cada núcleo, lo que nos ha llevado comprobar que la fibra multimodo presenta la peor respuesta y la desviación más alta. Por otro lado, ambas SMF presentan buenas respuestas en frecuencia, obteniendo con la monomodo de visible una mayor potencia en recepción, mayor ancho de banda y menor variabilidad en las medidas.

Teniendo en cuenta tanto las medidas de distribución espacial como el efecto de la fibra inyectora sobre la respuesta frecuencial, llegamos a la conclusión de que la fibra más adecuada es la monomodo de visible.

Capítulo 4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LOS NÚCLEOS INDIVIDUALES DE MC-POF DE DISTINTAS LONGITUDES

Tras la determinación de las condiciones óptimas de inyección, se procede a realizar el análisis de las propiedades de transmisión para cada uno de los núcleos de la MC-POF. Este estudio se ha realizado sobre una fibra comercial de 19 núcleos con perfil de salto de índice: SMCK-1000P del fabricante Asahi-KASEI [10] (SMCK en adelante). Se trata de una fibra de dimensiones estándar (diámetro conjunto de núcleos de 1 mm) fabricada en PMMA y que cuenta con una apertura numérica elevada de 0.6. Además, con el fin de estudiar la variabilidad de las propiedades entre distintos tipos de MC-POF, se ha realizado un análisis más simplificado para la fibra SH-1009 de 9 núcleos SI-POF, del fabricante Mitsubishi Rayon CO. El análisis para esta fibra se puede encontrar en el **Anexo II**, y las especificaciones de los dos tipos de fibras en el **Anexo I**.

Para realizar la caracterización de las propiedades de transmisión de la MC-POF SMCK se inyectará luz por cada uno de los 19 núcleos de la fibra de manera individual. Este procedimiento se ha llevado a cabo usando el sistema de inyección localizada descrito en el apartado 3 del Capítulo 2.

La caracterización experimental de las propiedades de transmisión de cada núcleo ha consistido en la toma de tres tipos de medida: potencia óptica a la salida, para lo cual usaremos el medidor de potencia PM100USB con el sensor S150C, ambos de Thorlabs, campo lejano y respuesta en frecuencia. Estas tres medidas nos permitirán obtener la atenuación, distribución espacial de la luz y ancho de banda de cada uno de los núcleos, respectivamente. Además, centrandolo estudio en la fibra SMCK-1000P, se realizará este mismo procedimiento para tres muestras de fibra SMCK de distintas longitudes (10, 50 y 84 metros), sin garantizar que todas ellas proceden de distintos carretes.

4.1.POTENCIA TRANSMITIDA

Con las medidas individualizadas de potencia a la salida de cada uno de los núcleos se pretende observar la variabilidad en la atenuación introducida por cada uno de ellos. Además, la realización de las medidas para diferentes longitudes de la misma fibra, nos permite observar posibles patrones en la atenuación relativa entre núcleos o, por el contrario, que los resultados están incorrelados entre sí. Para realizar las medidas de potencia a la salida primero se comprueba por qué núcleo se transmite y, a continuación, se mide la potencia óptica con el medidor de Thorlabs PM100USB.

Una manera de observar este efecto es mediante la representación de la atenuación relativa cuando se realiza la transmisión núcleo a núcleo referenciada al núcleo con el que se obtiene mayor la potencia a la salida. Por un lado, podemos observar en la **Figura 4.1** la potencia a la salida de cada núcleo en función del carrete de fibra.

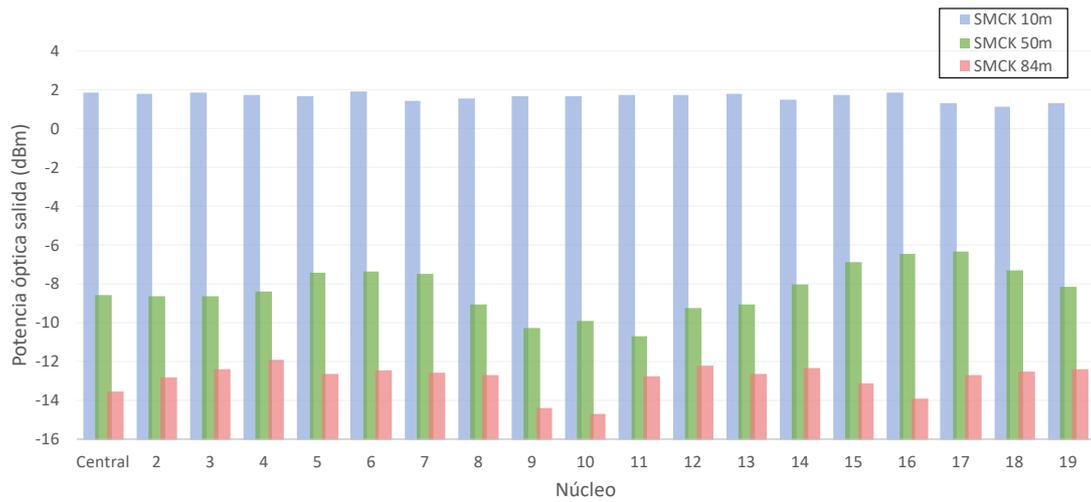


Figura 4. 1. Potencia óptica a la salida de cada uno de los núcleos para los tres segmentos de SMCK considerados para el análisis.

Para interpretar mejor los resultados, en la **Figura 4.2** se representa la atenuación relativa entre núcleos, fijando como referencia el núcleo en el que se obtiene un valor mayor. Se produce una diferencia notable entre las potencias que llegan al final de la fibra por los distintos núcleos, siendo particularmente grandes para la fibra de 50 metros. Además, como se puede observar en ambas gráficas, los resultados obtenidos tienden a seguir un cierto patrón, en el que los núcleos del 9 al 11 concentran las potencias ópticas más bajas a su salida, y los núcleos del 15 al 18 las más altas y, por lo tanto, introducen menor atenuación. Para ilustrar esta conclusión se ha incluido una gráfica de la máscara de la fibra en la que los niveles de gris representan los niveles de potencia óptica medidos a la salida de cada núcleo para la fibra de 50 metros.

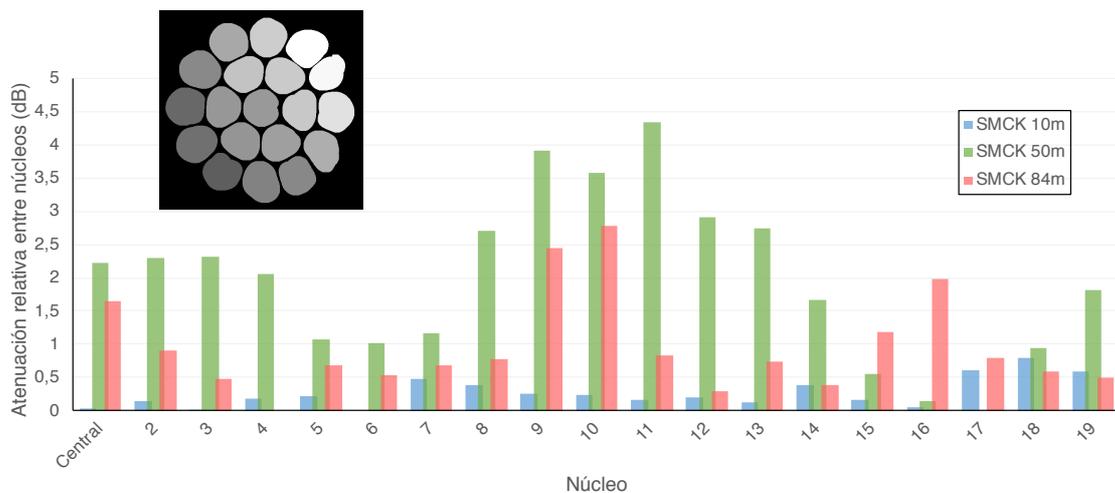


Figura 4. 2. Atenuación relativa entre núcleos para los tres segmentos de SMCK considerados para el análisis.

En esta figura podemos apreciar que las diferencias en la atenuación relativa son más notables en función de la posición geométrica del núcleo dentro de la fibra. Según el etiquetado de la **Figura 2.11**, se ha planteado que el comportamiento de la fibra puede quedar dividido en dos partes, siendo los núcleos situados en la parte superior derecha los que presentan mayor potencia óptica respecto a los situados en la parte inferior izquierda. En cuanto a la dependencia con la longitud del segmento, no se ha extraído ninguna conclusión clara. Si bien se pensaba que las diferencias de potencia óptica entre núcleos se verían incrementadas al aumentar la longitud de la fibra, se ha comprobado que las mayores diferencias de atenuación relativa entre núcleos se obtienen para el tramo de 50m. En estudios anteriores se demostró esta correlación entre atenuación y posición de los núcleos dentro de la estructura de la fibra [6].

4.2. DISTRIBUCIÓN ANGULAR DE LA INTENSIDAD A LA SALIDA DE LA MC-POF

Para realizar la medida de la distribución espacial de la luz a la salida de cada núcleo, se toman 15 medidas de FFP a la salida de cada uno de ellos para las tres longitudes de la fibra que se consideran en el estudio (10, 50 y 84 metros), usando el mismo montaje que el representado en la **Figura 3.5**. Además, se ha tomado el menor segmento posible de fibra SMCK que permitiese llevar a cabo las medidas (5 metros), considerándose como buena aproximación realizar las medidas de campo lejano de fibras cortas para medir la distribución espacial del láser. Todas las medidas se han realizado a una temperatura de operación de 25 °C y una corriente de polarización de 80 mA, a excepción de las que se han realizado para el tramo de fibra de 5 metros, que se ha optado por una intensidad de corriente de 65 mA para evitar que sature el receptor.

La distribución angular de corriente se puede estudiar mediante la obtención de los resultados en términos de EAF en función del ángulo de salida o mediante el perfil radial. Si bien se han hecho medidas de FFP para cada uno de los núcleos y cada una de las longitudes de fibra, se ha considerado apropiado agrupar los resultados según la geometría de la MC-POF. En las gráficas de la **Figura 4.3** se han representado las EAFs obtenidas para cada núcleo de las longitudes consideradas.

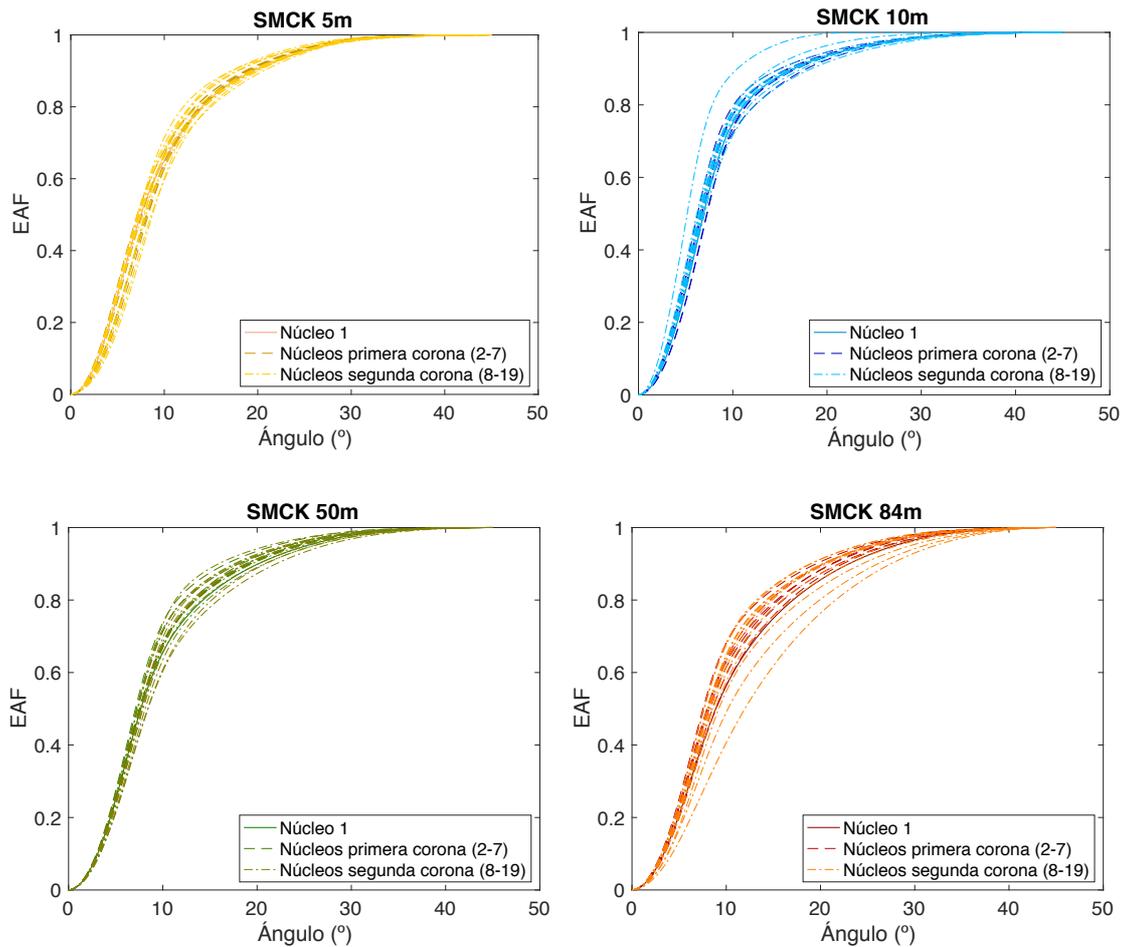


Figura 4. 3. EAF de cada núcleo de la SMCK considerando varias longitudes.

En todas las representaciones se puede observar que no existe gran variabilidad entre las medidas de los núcleos para cada fibra. Por otro lado, aunque la distribución de intensidad depende de la apertura de la fuente y de las condiciones de inyección, también observamos una ligera dependencia con la longitud de la fibra. Ya que, como se puede comprobar en la figura anterior, al aumentar la longitud de la fibra el EAF se ensancha.

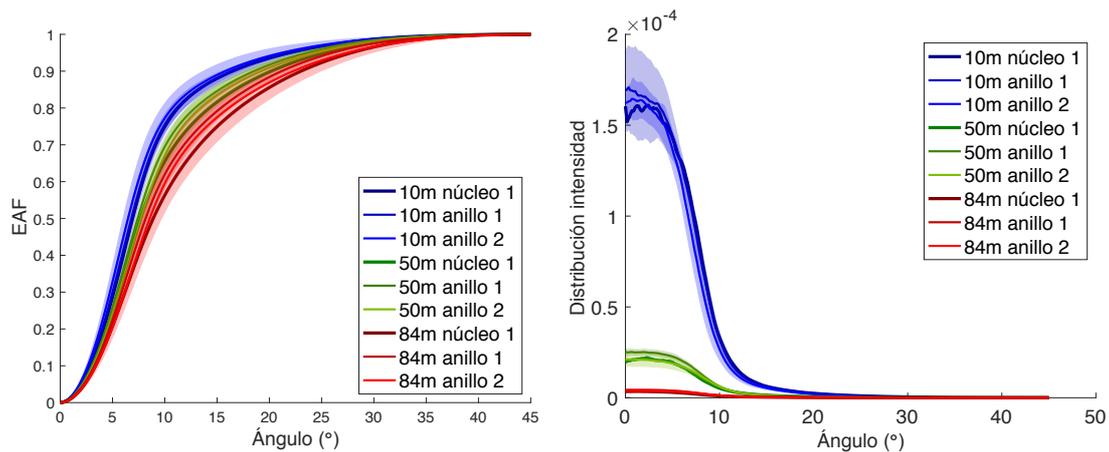


Figura 4. 4. EAF promedio y desviación estándar (izquierda) y distribución de intensidad promedio y desviación estándar (derecha) para todos los núcleos de los tres segmentos de fibra (10, 50 y 84 metros)

Para sostener este hecho, en la **Figura 4.4** se representan el EAF promedio y desviación estándar y el perfil radial promedio y su desviación, para las medidas de todos los núcleos de los tres segmentos de fibra (10, 50 y 84 metros).

No se observan diferencias significativas en la anchura de las distribuciones espaciales de los distintos núcleos ni en su variabilidad. Pero sí se produce un ensanchamiento proporcional al aumento de fibra, siendo el tramo de 84 metros el que mayor desviación presenta en sus medidas. Los resultados demuestran que para las longitudes consideradas aún sigue habiendo cambios en la distribución modal de forma que ésta se sigue ensanchando al aumentar la longitud de la fibra sin alcanzarse el equilibrio modal. Esta observación es consistente con el hecho de que la inyección desde la fibra monomodo de visible se está haciendo de forma muy confinada sobre cada núcleo de la MC-POF, y por tanto aún con la longitud relativamente larga de 50 metros el fenómeno de acoplo modal sigue ensanchando la distribución espacial. Para comprobarlo de manera analítica se han recogido los valores de EAF a media anchura en la **Tabla 4.1**.

Fibra	10 m	50 m	84 m
EAF a media altura (°)	6.7 ± 0.46	7.75 ± 0.36	8.66 ± 1

Tabla 4. 1. Valor de EAF a media altura para los tres segmentos de SMCK.

Los valores de anchura de EAF a media altura son 6.7 ± 0.46 , 7.75 ± 0.36 y 8.66 ± 1 , para 10, 50 y 84 metros, respectivamente, cumpliendo con lo comentado anteriormente sobre el ensanchamiento al aumentar la longitud.

Otra manera de confirmar estas observaciones es mediante la representación de la apertura numérica, calculada a partir del seno del ángulo del perfil radial para el cual la potencia cae al 1% de su valor máximo.

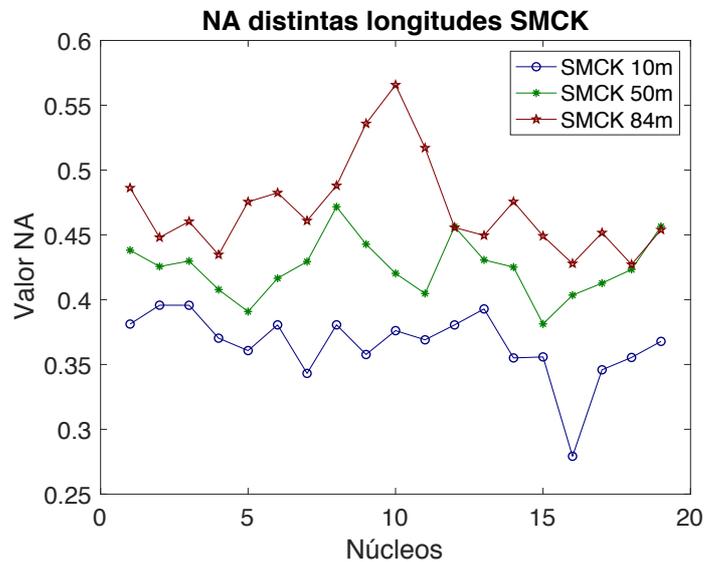


Figura 4. 5. NA para todos los núcleos de los tres segmentos de fibra (10, 50, 84 metros)

En la **Figura 4.5**, podemos observar que el valor de la apertura numérica aumenta al aumentar la longitud del tramo de fibra. La explicación de ello radica en que con tramos más largos de fibra el acoplo modal experimentado por la luz inyectada es mayor, apareciendo modos de mayor orden a la salida de la fibra y con ello, un aumento de la apertura numérica.

4.3. RESPUESTA EN FRECUENCIA

Por último, con el objetivo de caracterizar las propiedades frecuenciales de los núcleos individuales de la MC-POF, se han realizado medidas de respuesta en frecuencia de un enlace de comunicaciones a través de cada uno de los núcleos de la fibra para distintas longitudes. Como fuente óptica del enlace se ha usado la fuente del sistema de inyección localizada ya descrito en el capítulo 3, y como receptor el SPD-2 que ya se ha presentado en medidas anteriores del trabajo. Adicionalmente, se dispone en el laboratorio de otro receptor del mismo fabricante con características ligeramente distintas, siendo la principal diferencia que acepta una mayor apertura numérica a su entrada: SPA-2 650 nm, también de Graviton. Se han realizado algunas medidas también con el SPA-2. El estudio comparativo realizado entre los dos detectores se puede consultar en el **Anexo III**.

Para realizar las medidas de respuesta en frecuencia se sigue el mismo montaje que el comentado en la **Figura 3.2**. Vamos a trabajar con las condiciones estándar para el láser: temperatura de operación de 25 °C e intensidad de corriente de polarización de 80 mA para los tres segmentos de fibra a estudiar. Además, la potencia de RF de la señal generada por el VNA ha sido de 10 dBm.

En la **Figura 4.6** se representan las distintas medidas de respuesta en frecuencia de todo el sistema y de la propia fibra, descontando la respuesta en frecuencia de la propia electrónica del sistema, para todos los núcleos de los tres segmentos de la SMCK.

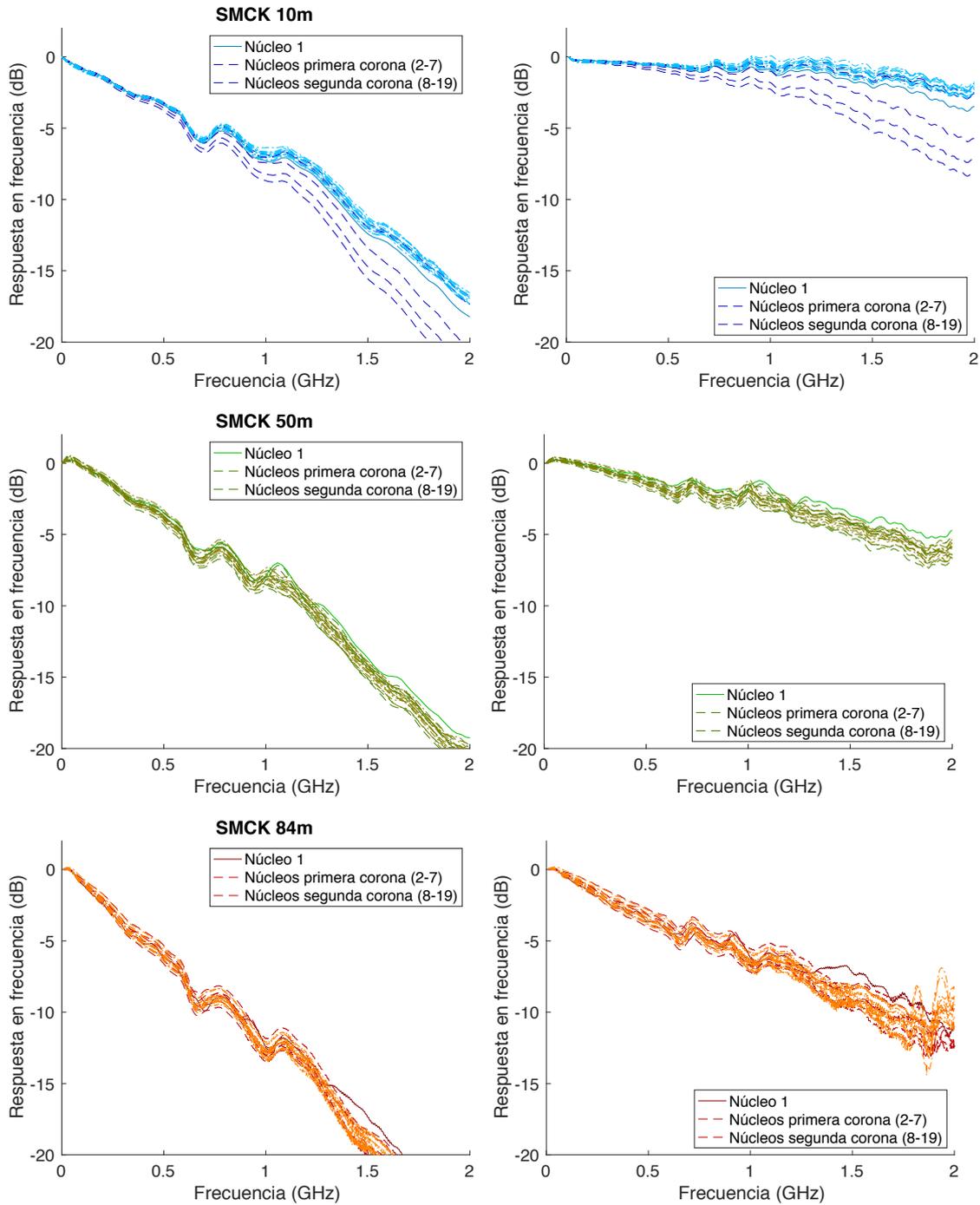


Figura 4. 6. Respuesta en frecuencia para cada uno de los núcleos considerando distintas longitudes

Como se puede observar, el ancho de banda de la propia fibra es superior al del sistema completo. Esto es debido a que los elementos electrónicos del sistema, que forman parte del transmisor y el receptor, añaden sus propias limitaciones al ancho de banda, de manera que si es inferior al de la fibra óptica restringen el ancho de banda total del sistema.

Para comparar el comportamiento entre los tres segmentos, se representa la media y desviación estándar de la respuesta frecuencial normalizada del sistema completo, incluidas las limitaciones de transmisor y receptor. Los resultados se pueden observar en la **Figura 4.7**.

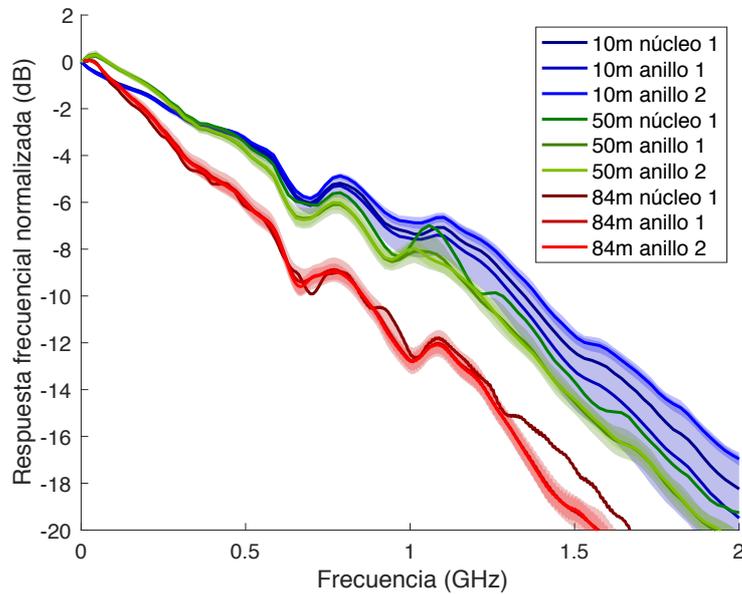


Figura 4. 7. Respuesta frecuencial normalizada de enlaces de distinta longitud a través de cada uno de los núcleos: núcleo central, primera corona y segunda corona

En la figura anterior se muestra los resultados obtenidos agrupados nuevamente según la ubicación de los núcleos. Además de la disminución de ancho de banda al aumentar la longitud, los resultados muestran como, en general, la transmisión a través del núcleo central no es la que presenta mejor respuesta frecuencial. En concreto, en la fibra de 10 metros, la transmisión a través de cualquiera de los núcleos del segundo anillo tendría mejores características frecuenciales, si bien las diferencias no son muy notables. Además, en esta longitud de fibra, la respuesta frecuencial usando los núcleos del primer anillo tiene una gran variabilidad, que creemos puede deberse a imperfecciones en el extremo de inyección de la MC-POF para algunos de los núcleos implicados.

De forma análoga, en la **Figura 4.8** se representan las respuestas frecuenciales obtenidas tras normalizar por la referencia, es decir, tras eliminar el efecto sobre el ancho de banda de los componentes activos del enlace, que se representó en la **Figura 3.3**.

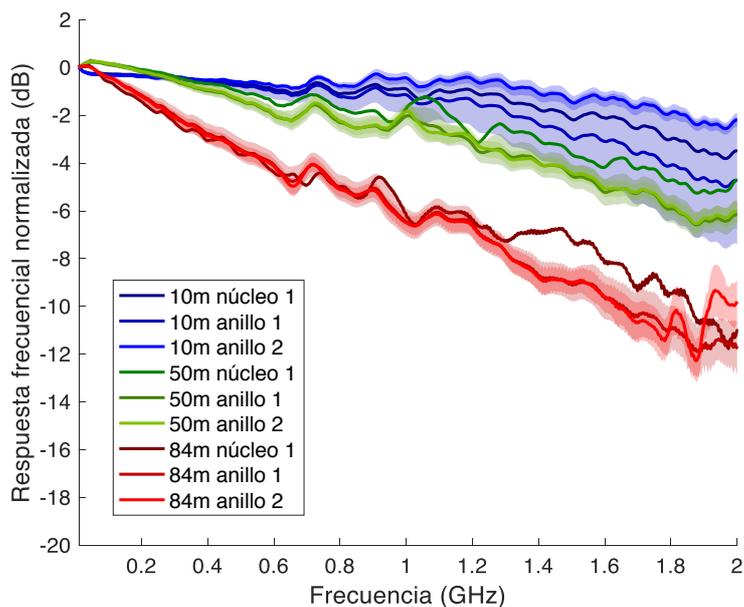


Figura 4. 8. Respuesta frecuencial normalizada de la fibra en enlaces de distinta longitud a través de cada uno de los núcleos: núcleo central, primera corona y segunda corona

Los anchos de banda tanto del sistema completo como de los núcleos individuales de la fibra, una vez se ha eliminado el efecto del transmisor y el receptor, se detallan en la **Tabla 4.2**.

FIBRAS	10 m	50 m	84 m
ANCHO DE BANDA DEL SISTEMA (MHz)	464 ± 33.7	419 ± 36.9	253 ± 16.2
ANCHO DE BANDA DE LA FIBRA (MHz)	1691 ± 990	1140 ± 138.1	432 ± 50.1

Tabla 4. 2. Anchos de banda medidos para los enlaces de distinta longitud.

Como cabía esperar, el ancho de banda ofrecido por cada núcleo de la MC-POF es sensiblemente superior al que tenemos en el enlace completo, lo que refleja la limitación impuesta por los elementos activos, transmisor y receptor. Lógicamente, al aumentar en la longitud de la fibra se produce una disminución de ancho de banda.

Capítulo 5 EXPERIMENTOS DE TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE LOS NÚCLEOS INDIVIDUALES DE MC-POF

En este último capítulo se ha estudiado la calidad de la comunicación del sistema, a través de varios núcleos individuales, mediante la medida de la tasa de error (BER) en función de la velocidad de transmisión. El objetivo es evaluar la capacidad de transmisión del sistema para poder conocer sus posibilidades como medio de transmisión en futuros enlaces de comunicaciones con multiplexación espacial. Se ha decidido realizar los experimentos utilizando una transmisión de pulsos NRZ (*Non Return to Zero*) debido a su sencillez, lo que consideraremos una transmisión de referencia que nos permitirá realizar comparaciones futuras con otros formatos de modulación. Se deja para estudios futuros la implementación y el estudio comparativo de las prestaciones del sistema para formatos de modulación más avanzados.

5.1. EXPERIMENTOS DE TRANSMISIÓN DE SEÑALES NRZ PARA MC-POF

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al medir la calidad de la transmisión en enlaces de comunicaciones que usan núcleos individuales de la MC-POF.

Para determinar la tasa de error de bit con las MC-POF, se utiliza el medidor de BER OptoBERT OPB3200 de Optollent. Este equipo es controlado por un entorno software desarrollado en LabVIEW, que permite seleccionar distintos parámetros como longitud de la secuencia PRBS o tasa de transmisión, entre otros, además de realizar barridos de la tasa de transmisión. Para realizar estas medidas ha sido necesario establecer un enlace completo de comunicaciones y se ha considerado de nuevo el dispositivo SPD-2 de Graviton en el extremo receptor. Además, y como paso previo a realizar las medidas de BER, también se han hecho medidas de diagrama de ojo mediante un osciloscopio, concretamente al modelo Infiniium DCA 86100A de Agilent.

El esquema del montaje utilizado se detalla en la **Figura 5.1**. Concretamente, cuando se quiere obtener el valor de BER la salida del SPD-2 va directa al OptoBERT (conexión morada) y cuando se quiere visualizar la señal en el osciloscopio va directa a este (conexión naranja).

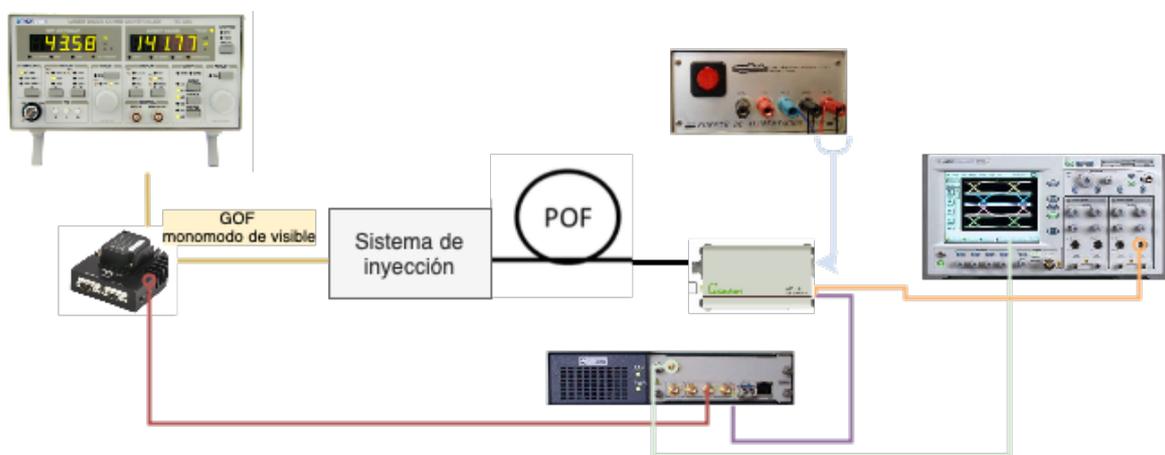


Figura 5. 1. Esquema del montaje utilizado para obtener el BER y visualizar la señal en el osciloscopio.

Partiendo de la configuración de la fuente óptica fijada mediante el estudio inicial de este trabajo, se pretende estudiar el efecto sobre las prestaciones de la transmisión de las distintas longitudes de fibra, así como la variabilidad encontrada entre los distintos núcleos. Por otra parte, se realizarán medidas de referencia o *Back to Back* (B2B) considerando dos tramos de fibra cortos (aproximadamente 1 metro) de SI-POF estándar, ambas fabricadas en PMMA y con un núcleo de 1 mm de diámetro: BH-4001 de Mitsubishi con apertura numérica de 0.6 (BH en adelante) y MH-4001 también de Mitsubishi con apertura numérica de 0.3 (MH en adelante). La medida de BER con fibras cortas nos permitirá estimar el efecto del transmisor y el receptor, sin tener en cuenta la degradación introducida por del canal.

Así pues, se han realizado barridos de BER en función de la tasa de transmisión a través de cinco de los diecinueve núcleos de la SMCK, de manera que elegimos el núcleo central, dos del primer anillo (2 y 6) y dos del segundo anillo (8 y 15). Este estudio se ha realizado para varios segmentos de fibra de distinta longitud (10, 50 y 84 metros). Además, se ha considerado un segmento adicional de 5 metros, con el que de antemano la transmisión debería ser buena, para las medidas por siete núcleos y tener una caracterización más completa de la fibra. Las medidas de BER se han realizado mediante la transmisión de una secuencia pseudoaleatoria PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) de longitud $10^{23} - 1$, que es el máximo valor que nos permite el equipo OptoBERT.

Como paso previo a la medida de la tasa de error de bit se observa la señal de salida del enlace mediante el osciloscopio, lo que nos permitirá conocer la situación de ruido del láser y la de posible saturación del receptor, de forma que podremos seleccionar los parámetros de operación con los que se va a llevar a cabo la transmisión.

Durante la realización de las medidas de BER en la configuración B2B (fibra muy corta), se ha observado una relación señal a ruido en el receptor muy pobre que origina una tasa de error muy elevada. La medida del diagrama de ojo de la señal a la salida del receptor nos ha permitido confirmar la aparición de un ruido que empeora fuertemente la calidad de la transmisión y que no se puede atribuir a limitaciones de potencia ni de ancho de banda. La **Figura 3.6** muestra a modo de ejemplo el diagrama de ojo para una tasa de 200 Mb/s con la fibra BH de 80 cm.

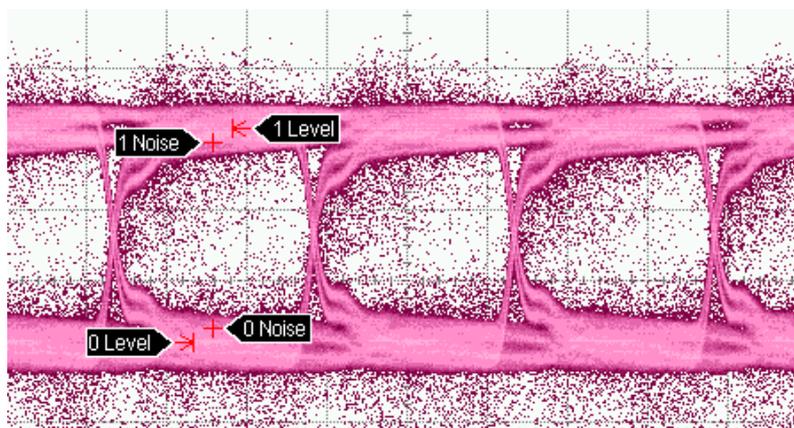


Figura 5. 2. Diagrama de ojo obtenido para fibra BH corta a una tasa de 200Mb/s

Este tipo de comportamiento nos resulta desconocido, y no ha sido antes observado en medidas de BER empleando otros transmisores. En concreto, el transmisor usado en este trabajo es el único del laboratorio que tiene un láser conectorizado con rabillo de fibra, por lo que tras hacer diversos experimentos de control llegamos a la conclusión de que la conectorización del láser con el rabillo de fibra está detrás de la causa del ruido desconocido. De hecho, se ha observado que la forma como se tenga el rabillo en el montaje (bucles, curvaturas, pequeños giros) afecta a dicho ruido hasta el punto de hacerlo prácticamente desaparecer cuando el rabillo se coloca en una posición óptima. Teniendo en cuenta que el conector al final del rabillo del láser es de tipo FC con terminación recta (PC), concluimos que el ruido es debido a reflexiones en el enlace que hacen que parte de la potencia transmitida vuelva al transmisor. Esta potencia óptica reflejada entraría de vuelta al láser a través del rabillo de fibra monomodo de visible generando una realimentación óptica en la cavidad láser que desestabilizaría al mismo. Probablemente este efecto se podría evitar mediante la terminación del rabillo con un conector FC-APC pulido en ángulo o impidiendo la entrada de luz reflejada al láser mediante un aislador óptico.

Tras ajustar la colocación del rabillo del láser y comprobar en el diagrama de ojo una reducción considerable del ruido, se observa una notable mejoría de la calidad de la transmisión que se refleja en valores razonables de BER. La **Figura 5.3** muestra la medida de tasa de error de bit en función de la tasa de transmisión para los dos tipos de fibra del estudio (MH y BH) y considerando dos intensidades de polarización distintas para el láser.

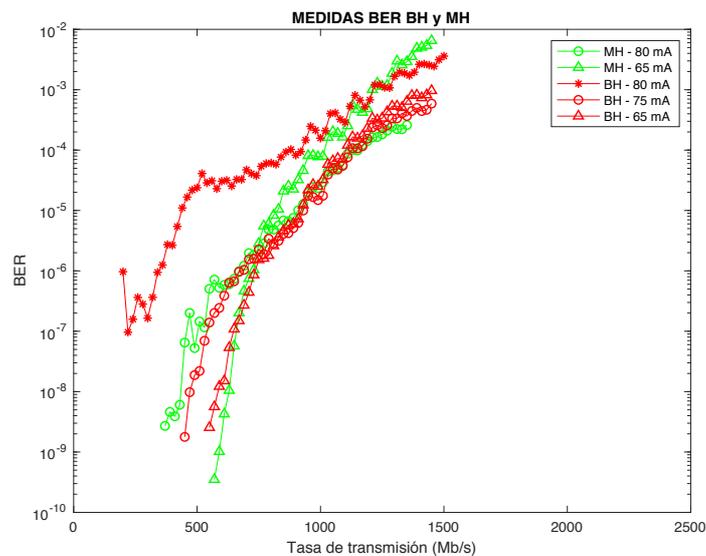


Figura 5. 3. Barrido BER para dos tramos de 80 cm POFs en función de la corriente de polarización [15]

Como se puede observar, el comportamiento de la tasa de error es similar en los dos tramos de fibra (BH y MH). En todos los casos estudiados la tasa de transmisión límite considerando un valor de BER de 10^{-3} (referencia pre-FEC) está en torno a 1500 Mb/s. Comparando los resultados para las dos corrientes de polarización se observan mejores resultados para la de 65 mA, ya que se consiguen mismas tasas de error con tasas de transmisión más altas. Cabe destacar que la medida realizada para la fibra BH a 80 mA satura el receptor y por ello presenta un peor comportamiento. Es por ello, que se ha decidido realizar la medida para una corriente

de 75 mA, que es el valor máximo que no lleva a saturación. Además, la potencia obtenida a la salida en estas condiciones es comparable con la del tramo de MH a 80 mA, recibiendo 0.7 dBm en el caso BH a 75 mA y 0.66 dBm en el caso de la MH a 80 mA.

Las primeras medidas de BER para obtener la referencia de calidad nos han demostrado lo inestable que resulta nuestra fuente óptica, por lo que, en las medidas restantes, resulta muy importante mantener la posición del rabillo de fibra inalterado. Además, tras analizar las medidas B2B se decide trabajar a una corriente de polarización de 65 mA, para evitar que el receptor sature, y una temperatura de de 25 °C.

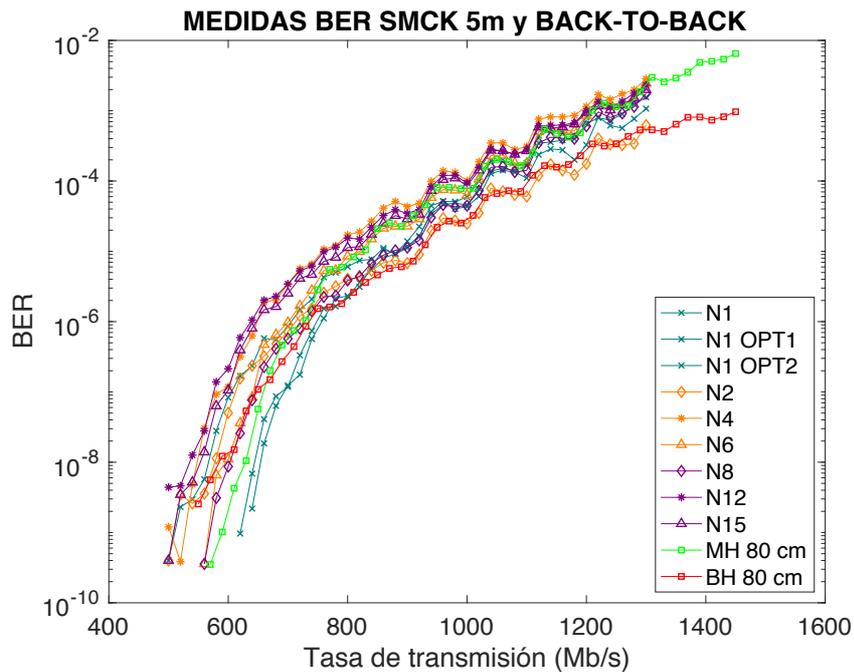


Figura 5. 4. Comparación BER en enlace de MC-POF de 5m a través de varios núcleos con dos tramos de fibra corta de POF convencional (BH y MH).

En primer lugar, en la **Figura 5.4** se muestran las medidas de BER en función del núcleo por el que se transmite, para el segmento de 5 metros, comparándolas con las obtenidas para los dos tramos de POFs de un solo núcleo utilizados como referencia (BH y MH). En este caso se ha realizado el estudio por un número mayor de núcleos; núcleo central, tres de la primera corona y tres de la segunda.

Por otro lado, para comparar la influencia con la longitud del segmento, se han realizado las mismas medidas para los segmentos de 50 y 84 metros, por un número menor de núcleos. Se representan en la **Figura 5.5**.

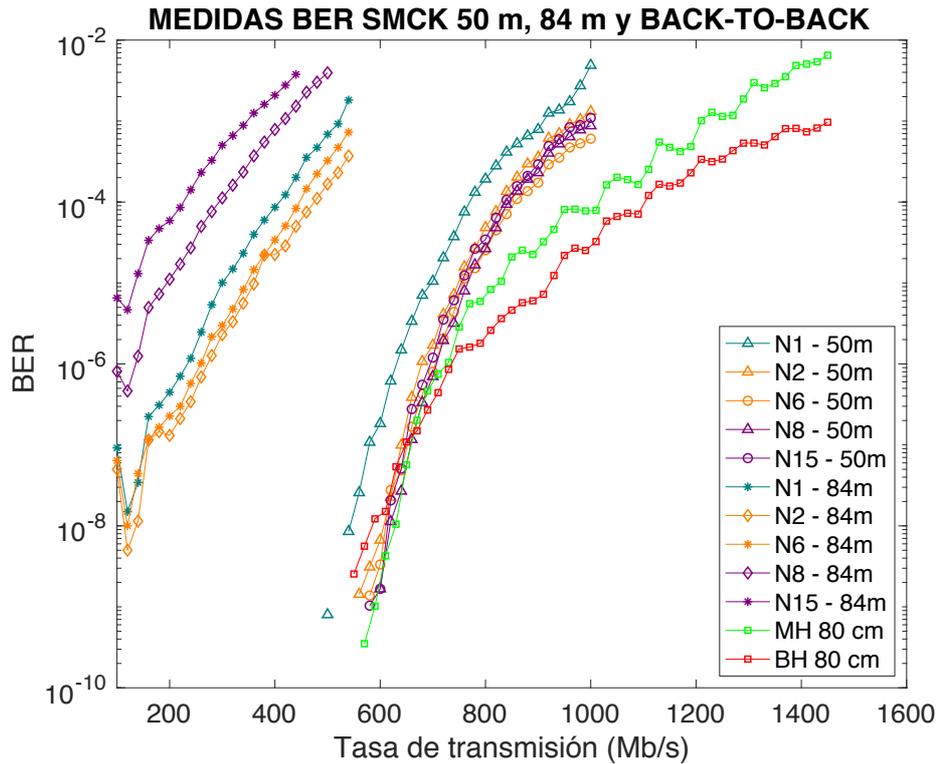


Figura 5. 5. Comparación BER en dos enlaces de distinta longitud a través de cinco núcleos, 50 y 84 metros, con dos tramos cortos de POF convencional (BH y MH).

Se puede comprobar que a medida que se aumenta la tasa de transmisión los errores también se incrementan. Para ambos segmentos de fibra el comportamiento de los núcleos es muy similar, de manera que las curvas de BER en función de la tasa son similares. Con el enlace de 5 metros de MC-POF, los resultados muestran que la transmisión sin errores comienza entorno a los 500-600 Mb/s y llega a conseguir tasas de 1.4 Gb/s para valores de BER de 10^{-3} , siendo comparable con los obtenidos para los dos tramos cortos de referencia de SI-POF. Para el segmento de 50 metros, no obtenemos tasas tan altas, siendo imposible transmitir por debajo de 10^{-3} en tasas mayores a 1 Gb/s.

Para ilustrar la comparación en la transmisión de pulsos entre un enlace a través de uno de los núcleos de la MC-POF y un tramo de SI-POF corto, obtenemos sus diagramas de ojo manteniendo la tasa de transmisión. En la **Tabla 5.1.** se pueden observar los diagramas de ojo del enlace de 5 metros por el núcleo central y el tramo de BH, para una tasa de 500 MHz.

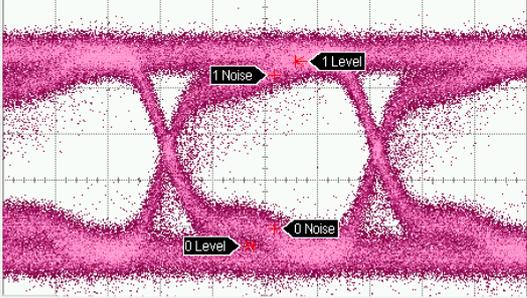
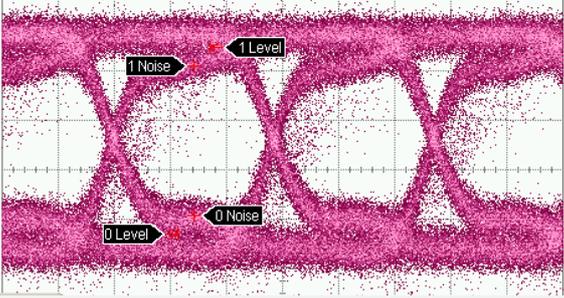
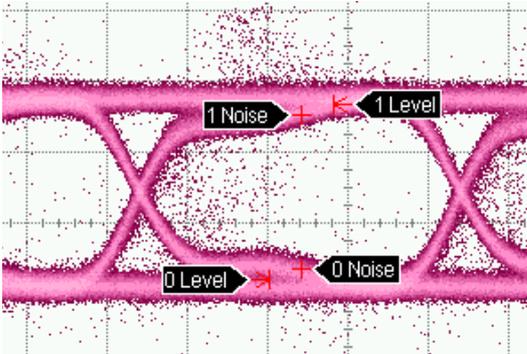
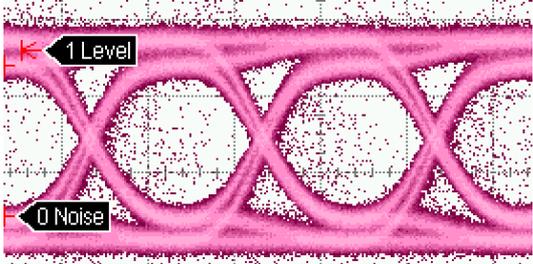
	500 Mb/s	1000 Mb/s
SMCK 5 m – núcleo central	 <p>Amplitud del ojo: 198.58– 402.28 mV Potencia recibida: -0.84 dBm</p>	 <p>Amplitud del ojo: 205.61 – 393.2 mV</p>
BH 80 cm	 <p>Amplitud del ojo: 261.822 - 434.28mV Potencia recibida: -2 dBm</p>	 <p>Amplitud del ojo: 204.29 – 396.35 mV</p>

Tabla 5. 1. Diagramas de ojo para SMCK 5 metros y BH 80 cm a 500 MHz.

La diferencia más notable que observamos es la amplitud del ojo, siendo mucho menor en el caso de la fibra de referencia BH de 80 cm, para la misma corriente de polarización (65 mA) y misma tasa de transmisión. En el caso del enlace con la SMCK de 5 metros la amplitud del ojo es de unos 200 mV, y en el de la BH de 30 mV. Esto respalda lo obtenido en la **Figura 5.4**, que ya se observaba una transmisión más eficiente con la SMCK de 5 metros.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para todas las longitudes de MC-POF consideradas, lo que nos permite sacar conclusiones sobre la pérdida de prestaciones al aumentar la longitud de la fibra óptica.

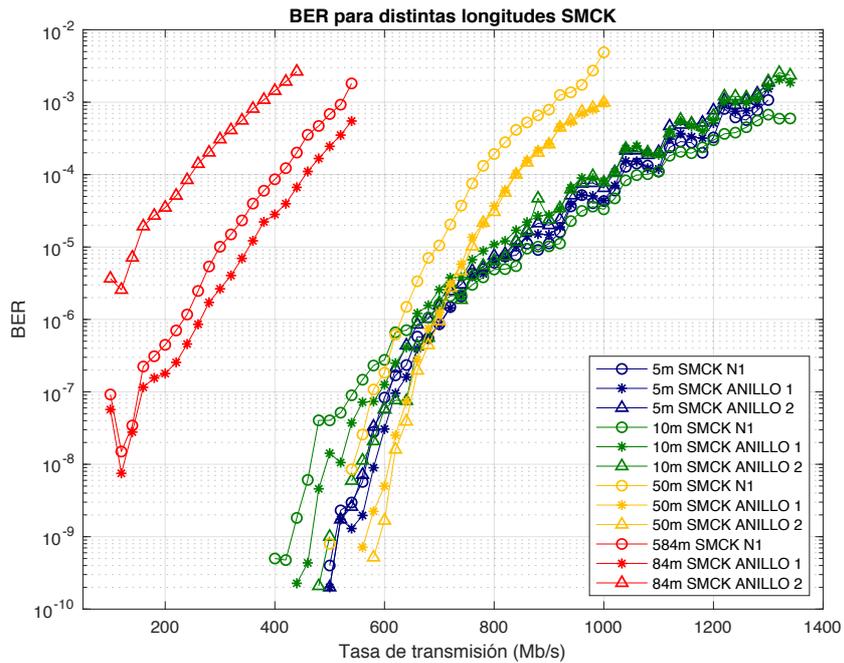


Figura 5. 6. Comparación BER para distintos enlaces de distinta longitud a través de varios núcleos; núcleo central, media núcleos primer anillo y media núcleos segundo anillo.

En la **Figura 5.6** se representan las curvas de BER dependiendo de la tasa de transmisión, realizadas para los cuatro tramos de SMCK en función del núcleo por el que se transmite, estando estos agrupados según su posición en la geometría de la fibra. Como podemos observar, no hay degradación aparente de las prestaciones del sistema para las fibras más cortas consideradas (5 y 10 metros), longitudes para las cuales se mantiene un rango aceptable de tasas de transmisión que abarcan desde los 400-600 Mb/s hasta los 1350 Mb/s. La transmisión sobre 50 metros comienza a mostrar pérdida de prestaciones limitando la tasa máxima aceptable a 1 Gb/s. Por otro lado, con el segmento de 84 metros ya es visible una pérdida importante de la calidad de la transmisión, siendo imposible transmitir por debajo de 10^{-3} en 500 Mb/s.

Con el objetivo de indagar en las causas que inducen la degradación de prestaciones al aumentar la longitud de la fibra, se han medido los diagramas de ojo de cada uno de los enlaces para varias tasas de transmisión. La comparación de dichos diagramas de ojo nos ayudará a dilucidar si la pérdida de prestaciones es debida a limitaciones en el ancho de banda, limitaciones de potencia, o más bien se trata de una combinación de ambos. La señal de salida del detector se visualiza en el osciloscopio, como se indica en la **Figura 5.1**. Cabe destacar que, a pesar de que se consiguiese optimizar el comportamiento del sistema para llevar a cabo la transmisión, el ruido del láser no se ha podido eliminar por completo, por lo que las medidas obtenidas son peores de lo que cabría esperar.

La comparación se ha realizado entre los diagramas de ojo de los enlaces de 5, 10, 50 y 84 metros a través de uno de los núcleos (núcleo central), para las mismas dos tasas de transmisión, como se refleja en la **Tabla 5.2**. Con ello se compara tanto si se produce una pérdida de prestaciones al aumentar la tasa, como si la hay debida al aumento de la longitud del segmento de la fibra.

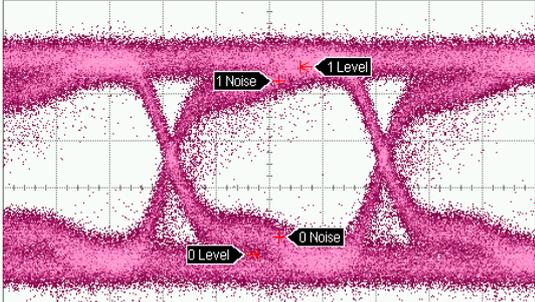
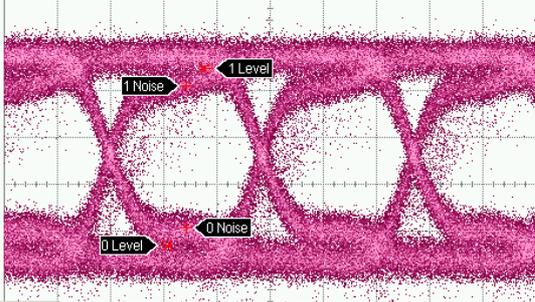
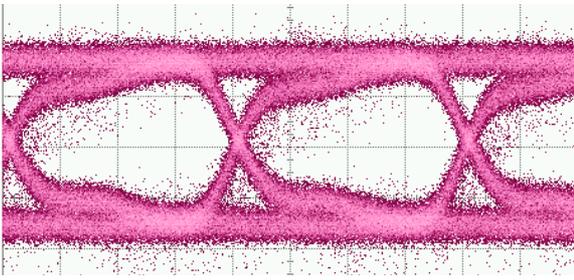
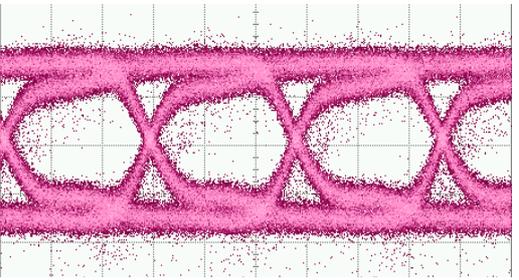
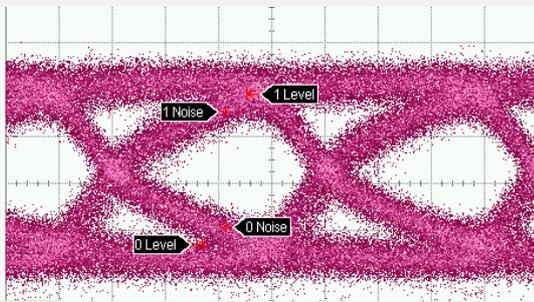
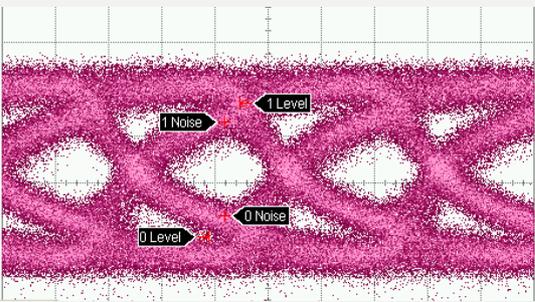
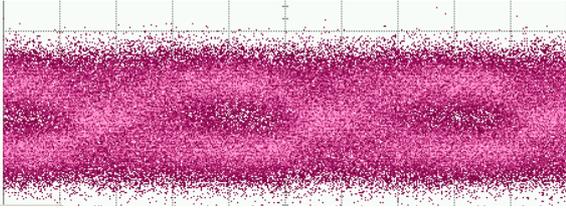
	500 Mb/s	700 Mb/s
5m	 <p>Amplitud del ojo: 198.58 – 402.28 mV Potencia recibida: -0.84 dBm</p>	 <p>Amplitud del ojo: 204.29 - 396.35 mV</p>
10m	 <p>Amplitud del ojo: 257.27 – 539.47 mV Potencia recibida: -1.3 dBm</p>	 <p>Amplitud del ojo: 263.68 - 530.98 mV</p>
50m	 <p>Amplitud del ojo: 54.57 - 104.50 mV Potencia recibida: -10.14 dBm</p>	 <p>Amplitud del ojo: 57.15 - 101.64 mV</p>
84m	 <p>Potencia recibida: -16.7 dBm</p>	No se consigue transmisión a 700 Mb/s

Tabla 5. 2. Diagramas de ojo para SMCK 5, 10 y 84 metros transmitiendo en 500 MHz y 700 MHz.

La **Tabla 5.2** se puede analizar en dos sentidos. Por un lado, se puede observar que los errores se incrementan a medida que se aumenta la tasa de transmisión. En este caso, el incremento de la tasa es de 200 Mb/s y no supone un aumento significativo en la tasa de error en ningún caso. Sin embargo, a partir de los 1000 Mb/s ya se observa esa degradación impidiendo identificar los pulsos correctamente. Por otro lado, también es posible analizar cómo cambian los ojos en función de la longitud de fibra utilizada, observando una pérdida importante de las prestaciones al trabajar con enlaces más largos. En el caso de transmitir a 500 Mb/s, la amplitud del ojo disminuye de 203.7 mV, para 5 metros, hasta 49.93 mV, con 50 metros. La degradación sufrida para la tasa de 700 Mb/s es similar a esta última. Por otro lado, la fibra de 84 metros no es comparable con las anteriores, dado que no ha sido posible identificar la forma de los pulsos correctamente en la tasa de inicio de las anteriores (500 Mb/s). En esta situación se ha obtenido un ojo muy cerrado debido al ruido, lo que conlleva un aumento importante en la tasa de error, como habíamos comprobado anteriormente.

En cuanto a la causa de la degradación de la calidad de la transmisión, además de la citada limitación debido a la disminución de potencia, se observa el efecto de la limitación de ancho de banda al aumentar la longitud de la fibra (disminución de la apertura horizontal del ojo). En concreto, si comparamos los ojos obtenidos para una tasa de 500 Mb/s con 5 metros y 50 metros, observamos que a pesar de que el valor de BER es similar (**Figura 5.6**), el ojo se ha distorsionado debido a la disminución de ancho de banda. A partir de esta observación, podemos concluir que los mecanismos que inducen la degradación de prestaciones para fibras cortas y largas es diferente, predominando en este segundo caso la limitación debida al ancho de banda y en el primero la aparición del ruido de la fuente. Esta diferencia se refleja en el cambio de pendiente observado en la representación de BER frente a tasa de transmisión de la **Figura 5.6**.

5.2.COMPARACIÓN CON OTRAS FIBRAS

Finalmente, se pretende estudiar si la transmisión de señales NRZ a través de núcleos de MC-POF es comparable con la de otros tipos de fibras ópticas de plástico más comunes y de ser así, analizar si se presenta como una solución ventajosa o, por el contrario, poco óptima. Para ello, se han tomado medidas de BER en función de la tasa de transmisión para segmentos de igual longitud (50 metros) de distintas fibras. Por una parte, la fibra MC-POF (SMCK-1000P) con la que se ha trabajado, y por otra parte, se dispone de dos tipos de SI-POF o fibra de salto de índice (Boeing BH4001 y ESKA PREMIER MH4002), y una GI-POF o fibra de gradiente de índice (OM-Giga).

Tras medir la potencia a la salida de cada fibra y los diagramas de ojo se ha fijado la intensidad de corriente de polarización a 65 mA para realizar todas las medidas. Las curvas de BER para las diferentes fibras frente a la tasa de transmisión se muestran en la **Figura 5.8**.

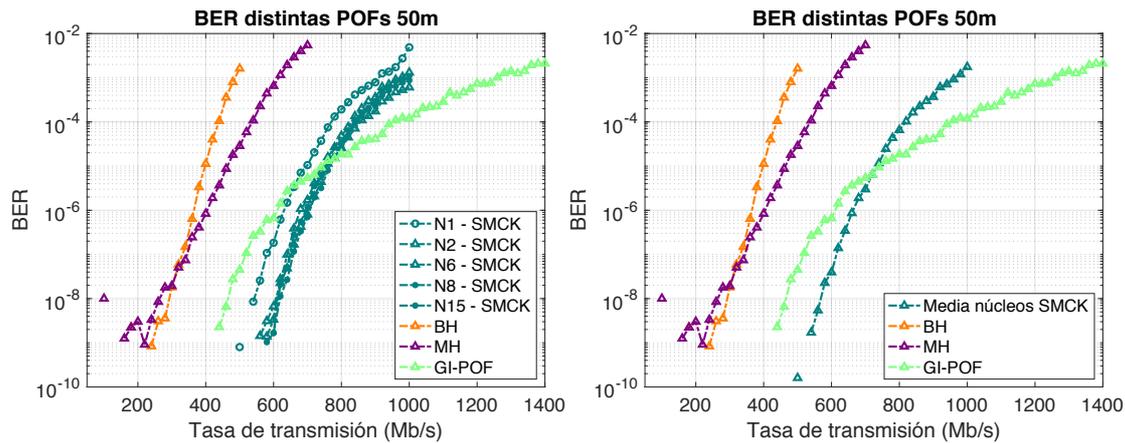


Figura 5. 7. Comparación BER para distintas POFS de la misma longitud (50 m).

En la figura anterior se representa la comparativa, en términos de BER, entre las fibras SI-POF y GI-POF con los 5 núcleos considerados de la MC-POF (izquierda), y con el promedio de ellos (derecha).

Como se puede observar, las fibras de salto de índice, BH y MH, se posicionan como peores candidatas, presentando las peores propiedades de transmisión. Éstas no son capaces de transmitir tasas de errores por debajo de los 10^{-3} para tasas de transmisión superiores a 500 Mb/s. Por el contrario, a esa misma tasa tanto la fibra de gradiente de índice como la multinúcleo permiten transmitir con tasas de error del orden de 10^{-9} (MC-POF) y 10^{-8} (GI-POF), siendo comparables entre sí.

Centrando el estudio de la comparación entre la MC-POF y la GI-POF observamos que las propiedades de transmisión que se consiguen con ambas son similares. Si bien con la fibra multinúcleo se consiguen tasas de error más bajas por debajo de los 750 Mb/s, la fibra de gradiente de índice permite llegar a tasas de transmisión más altas con los mismos errores, alcanzando tasas de transmisión máximas de casi 1.4 Gb/s frente a 1 Gb/s para la MC-POF.

En el Anexo III se pueden consultar algunos diagramas de ojo tomados para estas dos fibras, donde se puede comprobar que en el caso de la GI-POF la transmisión está limitada principalmente por ruido, mientras que en la MC-POF la limitación de ancho de banda es más notoria.

Con el fin de apoyar los resultados obtenidos transmitiendo por las distintas fibras de 50 metros de longitud, hemos estudiado las respuestas frecuenciales para cada una de las fibras bajo las mismas condiciones, lo que nos permitirá disponer de la información de ancho de banda.

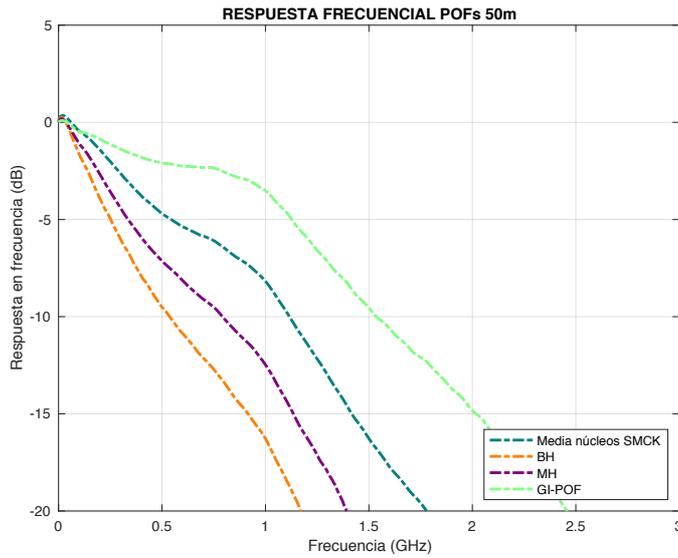


Figura 5. 8. Respuestas frecuenciales POFs 50 m.

ANCHO DE BANDA (MHz)	
SMCK	332
BH	163
MH	219
GI-POF	920

Tabla 5. 3. Ancho de banda de las POFs estudiadas

En la **Figura 5.10** se pueden observar las respuestas en frecuencia normalizadas del sistema completo, para los cuatro segmentos de fibra. Como cabía esperar, la GI-POF presenta una respuesta muy plana en frecuencia, proporcionando el mayor ancho de banda (920 MHz, detallados en la **Tabla 5.3**), seguido de la MC-POF. La curva más pendiente en frecuencia se da para la fibra BH, presentando el peor ancho de banda y, por tanto, las peores propiedades en transmisión.

Tiene sentido obtener mejores propiedades con la fibra multicore, debido a que la dimensión del núcleo por el que se guía la luz es 5 veces menor que los de otras POFs. A pesar, de que los resultados obtenidos han favorecido a la GI-POF, se ha demostrado que la MC-POF es comparable a esta última, ya que se ha comprobado que la fibra multinúcleo estudiada puede proporcionar un ancho de banda de 330 MHz por un solo núcleo. De esta manera, si fuésemos capaces de transmitir por los 19 núcleos de la SMCK usando un multiplexor y demultiplexor espacial adecuados y dado el nulo crosstalk entre núcleos, se podría realizar una transmisión NRZ a más de 6Gb/s sin necesidad de emplear formatos de modulación que añadieran complejidad al sistema..

Capítulo 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Por último, en este capítulo se hace un repaso de todos los objetivos abarcados durante el trabajo y se exponen las conclusiones extraídas de ellos. Con el objetivo de promover la continuidad del estudio de las fibras ópticas de plástico multinúcleo, al final de este apartado, se plantean una serie de líneas atractivas para realizar como futuros estudios.

En este proyecto se ha realizado el estudio de las propiedades de transmisión de una MC-POF de PMMA por cada uno de sus núcleos. En este caso, se ha centrado el estudio para una MC-POF comercial de 19 núcleos SI-POF, considerando segmentos de fibra de distintas longitudes.

En primer lugar, ha sido necesario realizar la puesta a punto del sistema de inyección localizada disponible en el laboratorio. La optimización del sistema, que nos ha garantizado el cumplimiento de unas condiciones favorecedoras en la transmisión de luz desde la fibra óptica de vidrio a la fibra óptica de plástico, se ha dividido en dos partes. Primero se ha estudiado el comportamiento de la fuente óptica para decidir cuáles eran los parámetros óptimos de operación. Por último, se ha realizado un estudio para seleccionar la fibra inyectora, en el que se han comparado tres tipos de fibras. Finalmente, se ha podido determinar que la mejor candidata para realizar la inyección es la misma fibra con la que se conecta la fuente óptica (monomodo de visible), presentando mejor ancho de banda y menor variabilidad en las medidas.

El siguiente objetivo, tras determinar las mejores condiciones de inyección, ha sido el análisis de las propiedades de transmisión. La caracterización experimental de los núcleos individuales ha consistido en la realización de tres tipos de medidas: potencia óptica transmitida, distribución angular de intensidad en campo lejano y respuesta frecuencial. De esta manera, se han determinado la atenuación, distribución de la luz y ancho de banda de cada uno de los núcleos de la fibra, comparándose entre ellos. Se han observado grandes variaciones de potencia (hasta 4 dB), además de identificar un patrón en función de la posición geométrica de cada núcleo. Sin embargo, las diferencias en las características espaciales y frecuenciales no son significativas, más allá de la variabilidad debida a la diferencia de longitud entre los tres tramos de fibra considerados.

El estudio ha terminado con el análisis y optimización de la calidad de la transmisión a través de varios núcleos. Para ello se ha realizado la transmisión mediante pulsos NRZ a través de varios núcleos de la MC-POF, comparándose los resultados con POFs convencionales. Tras la realización de medidas de BER, se ha demostrado que las fibras multinúcleo presentan mejores propiedades de transmisión que otras POFs, siendo capaces de obtener un BER de 10^{-6} a tasas de 700 Mb/s transmitiendo por uno de los núcleos y de alcanzar tasas de hasta 1 Gb/s considerando BER pre-FEC de 10^{-3} .

Toda la serie de resultados obtenidos nos han demostrado el buen comportamiento de esta fibra en cuanto a capacidad de transmisión. Por ello, hemos concluido que es viable introducir este tipo de fibras en enlaces de comunicaciones que implementen técnicas de multiplexación espacial.

Tras la realización del análisis de las propiedades de transmisión de los núcleos de la MC-POF se han contemplado futuras líneas de investigación que tengan como referencia este estudio. Toda la caracterización realizada en este proyecto demuestra la efectividad del uso de las fibras multinúcleo implementando técnicas de multiplexación espacial. Por tanto, la principal línea futura es la puesta a punto de un enlace de comunicaciones basado en MC-POF con técnicas de multiplexación espacial. Además, dado que el análisis de la calidad del sistema se ha realizado para transmisiones mediante pulsos NRZ, el punto de experimentos de transmisión a través de los núcleos de la MC-POF queda abierto. Ante ello, se propone como proyecto paralelo el estudio comparativo de las prestaciones de la comunicación usando formatos de modulación más avanzados.

Por otro lado, en el estudio de las condiciones de inyección se puso de manifiesto una serie de limitaciones al estudiar el efecto sobre las prestaciones de la transmisión del transmisor y el receptor. A pesar de que se acotó el origen del que provenía, no hay hechos experimentales que nos lleven a justificarlo, por lo que un estudio que profundizase en más detalle la configuración de la fuente óptica permitiría optimizar las prestaciones del sistema.

Para concluir, las medidas tomadas durante el estudio realizado presenten servir de utilidad para desarrollar un modelo que permita simular el comportamiento de MC-POF. De esta manera, se plantea para estudios futuros ampliar el análisis utilizando distintos tipos de MC-POF como fibras un núcleo superior a 19 o fibras multinúcleo de gradiente de índice.

REFERENCIAS

- [1] Olaf ZIEMANN, Jürgen KRAUSER, Peter E. ZAMZOW, Werner DAUM, “*POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*” (Springer, 2008).
- [2] Andreas GRZEMBA, “*MOST: The Automotive Multimedia Network*” (Franzis Verlag, 2011).
- [3] M. Ángeles LOSADA, Javier MATEO, “*Short Range (In-Building) Systems and Networks: A Chance for Plastic Optical Fibers*”, Capítulo en “*WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering*”, N. Antoniadis, G. Ellinas, I. Roudas (Springer, 2012).
- [4] Dwight H. RICHARDS, et al., “*Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System*”, J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 3, pp. 468-475, 2013.
- [5] Amaia BERGANZA, “*Estudio y Caracterización de las Fibras Ópticas de Plástico Multinúcleo*”, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, Bilbao, 2013.
- [6] Manuel CHUECA, “*Desarrollo de un Sistema experimental para medidas de campo cercano en fibras ópticas de plástico multinúcleo*”, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2015.
- [7] Roman KRUGLOV, Juri VINOGRADOV, Olaf ZIEMANN, “*Gigabit transmission over standard POF beyond 50 m*”, Proc. 27th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers (POF 2018), Seattle (USA), 2018.
- [8] Kotaro KOIKE, Yasuhiro KOIKE, “*Design of Low-Loss Graded-Index Plastic Optical Fiber Based on Partially Fluorinated Methacrylate Polymer*”, J. Light. Technol., vol. 27, no. 1, pp. 41-46, 2009.
- [9] Alicia LÓPEZ, M. Ángeles LOSADA, Javier MATEO, Joseba ZUBIA, “*On the Variability of Launching and Detection in POF Transmisssion Systems*”, Proceedings of the 20th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2018), Budapest (Hungria), 2018.
- [10] M. Ángeles LOSADA, Apuntes de la asignatura Dispositivos y Sistemas de Transmisión Óptica, Universidad de Zaragoza, 2019
- [11] Karamdeep SINGH, Gurmeet KAUR, “*Multi-Core Fibers: An Overview*”, Proc. Int. Conf. on Emerging Technologies in Electronics & Communication (ICETC 2013), Punjab (India), 2013.
- [12] Jon ARRUE, Joseba ZUBIA, Gaizka DURANA, Javier MATEO, “*Parameters affecting bending losses in graded- index polymer optical fibers*”, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 7, no. 5, pp. 836-844, 2001.
- [13] Frank. A. DOMÍNGUEZ-CHAPMAN, Javier MATEO, M. Ángeles LOSADA, Alicia LÓPEZ, Carmen VÁZQUEZ, Joseba ZUBIA, “*Experimental System for Automatic Alignment of Plastic Optical Fibres*”, Proc 25th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers (POF 2016), Birmingham (U.K.), 2016.

- [14] M. Ángel PASTOR, *“Desarrollo de un sistema de inyección para la caracterización individualizada de núcleos en fibras ópticas de plástico multinúcleo”* Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2020.
- [15] Prof. Esteban SANCHIS Prof. Juan B. EJEÁ, *“TEMA B.6. El diodo láser”* Escola Técnica Superior Enginyeria. Universitat de Valencia, 2008.
- [16] Harry J. R. DUTTON, *“Understanding Optics Communications”*, International Technical Support Organization, IBM, 1998
- [17] Alicia LÓPEZ, M. Ángeles LOSADA, Javier MATEO, Xin JIANG, Dwight H. RICHARDS, Neo ANTONIADES, *“Transmission Performance of Plastic Optical Fibers Designed for Avionics Platform”*, J. Lightw. Technol, vol. 36, no. 21, pp. 5082-5088, 2018.
- [18] Wilson LEAL, *“La fibra óptica: redes y aplicaciones”*, Universidad de La Laguna: Trabajo Fin de Grado, 2017.
- [19] Paul POLISHUK, *“Plastic Optical Fibers Branch Out”*, IEEE Comm. Mag., vol. 44, no. 9, pp. 140-148, 2006.
- [20] Pamela M. EBERLE, *“Estudio y análisis de fibras ópticas de plástico para transmisión de medios multimedia en entornos HAN”*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas: Proyecto Fin de Estudios, 2017.
- [21] Jon ARRUE, Joseba ZUBIA, *“Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications”*, Optical Fiber Technology, vol. 7, pp. 101-140, 2001.
- [22] Alicia LÓPEZ, M. Ángeles LOSADA, Javier MATEO, *“Last Mile Systems, In-House-Networks, LAN and MAN Applications: Polymer Optical Fibers, POF”*, en *Optical and Microwave Technologies for Telecommunication Networks*, O. Strobel, John Wiley & Sons (ISBN: 9781119971900), 2016, pp. 306-328.
- [23] Alejandro ALONSO, *“Hogar Digital para servicios FTTH: dispositivos, tecnologías, y QoE”*, Universidad Politécnica de Madrid: Trabajo Fin de Grado, 2013.
- [24] Ester SERRANO, *“Técnicas de multiplexación por división en el espacio (SDM): estudio e implementación”*, Universitat Oberta de Catalunya: Trabajo Fin de Máster, 2020.
- [25] David ESPINOSA, *“Desarrollo de un sistema automático de captación y análisis de imágenes de la distribución de campo lejano de fibras ópticas”*, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Proyecto Fin de Carrera, 2004.
- [26] Estela LAPORTA, *“Caracterización experimental de las propiedades de transmisión en fibras ópticas de plástico de índice gradual (GI-POF)”*, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2016.

ANEXOS

ANEXO I. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS Y MANUALES

En este anexo se adjuntas las hojas de características y manuales del equipo utilizado para la realización del estudio.

I.1. LÁSER LP660-SF40 Y BASE DE POLARIZACIÓN LDM9LP



Pigtailed Laser Diode, SMF



LP660-SF40

Description

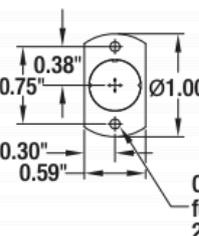
Thorlabs' Single Mode Pigtailed Laser Diodes are standard TO-packaged diodes that have been pigtailed to a 1 m long single mode fiber with an FC/PC connector. Each unit is tested before shipment. Please refer to the unit-specific test datasheet for optimal operating parameters.

Specifications

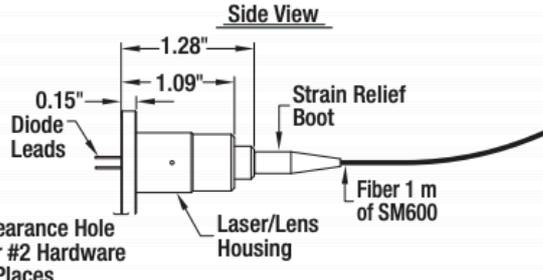
LP660-SF40 Specifications		LP660-SF40 Specifications			
LD Reverse Voltage (Max)	2 V	Min	Typ.	Max	
PD Reverse Voltage (Max)	30 V	Wavelength	653 nm	658 nm	663 nm
Optical Output Power	40 mW (Typ.) 45 mW (Max)	Threshold Current*	-	60 mA	75 mA
Operating Temperature	0 to 50 °C	Slope Efficiency*	0.35	0.55	-
Storage Temperature	-10 to 65 °C	Operating Current @ P _o = 40 mW*	-	135 mA	170 mA
Pin Code	5H	Operating Voltage @ P _o = 40 mW*	-	2.5 V	3.0 V
Fiber	SM600	*Temperature = 25 °C			
Connector	FC/PC				

Drawing

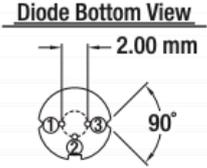
Pigtail Bottom View



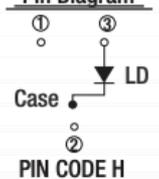
Side View



Diode Bottom View



Pin Diagram



PIN CODE H



NOTICE

To avoid equipment damage from electrostatic discharge: Wear ESD wriststrap when handling this device.

June 6, 2013
21834-S01, Rev B
www.thorlabs.com/contact

Specifications Subject to Change without Notice

LDM9LP



Description

Thorlabs' LDM9LP is an LD and TEC mount designed for use with all of our 3- and 4-pin pigtailed diodes. The compact housing protects the pigtail from physical damage, while also offering excellent thermal characteristics. Its clamshell design reduces thermal gradients across the diode, while its cold block cradles the pigtail housing for excellent contact and heat transfer. Two 1/4" through holes can be used for securing the mount to an optical table with 1/4"-20 or M6 cap screws. The LDM9LP interfaces with all of Thorlabs' LD Current Controllers and TEC Controllers. An RF SMA connector allows access to a Bias-T circuit for RF modulation of the laser's drive current (200 kHz to >1 GHz).

Specifications

Performance Specifications	
Laser	
Lasers Supported	Thorlabs' Pigtails Laser Diodes
Laser Pin Configurations	A, B, C, D, E, G, H
Laser Current (Maximum)	1 A
RF Modulation (Bias-T)	>200 kHz
RF Power	500 mW
RF Input Impedance	50 Ω
TEC	
TEC Current	4.5 A
TEC Voltage	3.0 V
TEC Heating/Cooling Capacity	7 W (Mounted to 12" x 12" Breadboard)
Temperature Sensor	10 kΩ NTC Thermistor, ±1% at 25°C, B = 3988



Physical Specifications	
Laser Polarity Select	External Slide Switch
Photodiode Polarity Select	External Slide Switch
TEC Interface	DB9 Male
Laser Interface	DB9 Female
RF Input Connector	SMA Jack
Interlock Connector	2.5 mm Phono Jack
Indicator	LD Enabled (Green LED)
Size (L x W x H)	4.48" x 3.5" x 2.1"
Weight	550 grams

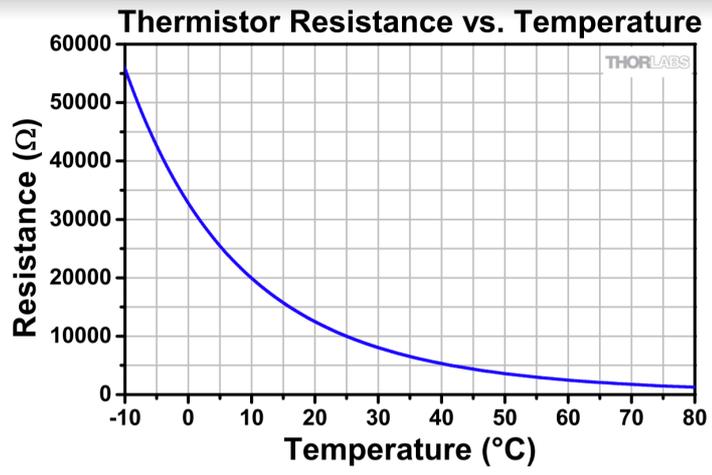


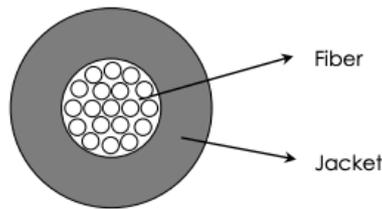
Figura I. 1. Gráfica termistor resistencia-temperatura

AsahiKASEI

SMCK-1000P(MC-7450N-E-04)

1. STRUCTURE

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



2. PROPERTIES

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

3. RoHS certification

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

Sample conditions

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

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

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

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

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

I.3. FIBRA SH1009

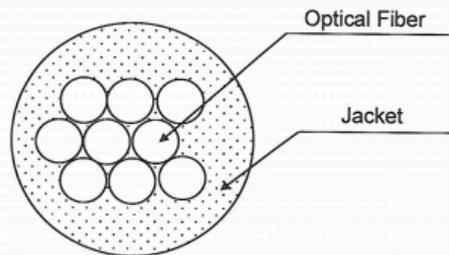
No. SPC090204-01

1. Scope
This specification covers basic requirements for the structure and optical performances of SH1009-1.25.
2. Structure

Table 1

Item		SH1009-1.25			
		Unit	Min.	Typ.	Max.
Optical Fiber	Core Material	—	Polymethyl-Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Polymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Refractive Index Profile	—	Step Index		
	Numerical Aperture	—	0.5		
	Core Diameter	µm	217	240	263
	Cladding Diameter	µm	227	250	273
Number of Fibers		—	9		
Jacket	Material	—	Polyethylene		
	Color	—	Black		
	Diameter	mm	1.20	1.25	1.30
Approximate Weight		g/m	1.3		
Indication on the Jacket		—	None		

Sectional View



3. Performances

Table 2

Item		Acceptance Criterion and/or [Test Condition]	SH1009-1.25 Specification			
			Unit	Min.	Typ.	Max.
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration [in a Dry Atmosphere]	°C	-55	—	+70
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties* [in a Dry Atmosphere]	°C	-55	—	+70
		No Deterioration in Optical Properties** [under 95%RH condition]	°C	—	—	+60
Optical Properties	Transmission Loss [650nm Collimated Light]	[25°C 50%RH]	dB/km	—	—	650
		[Operation Temperature]	dB/km	—	—	700
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment ≤ 0.5 dB [A Quarter Bend]	mm	15	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment ≤ 1 dB [in Conformity to the JIS C 6861]	Times	—	—	—
	Tensile Strength	Tensile Force at 5% Elongation [in Conformity to the JIS C 6861]	N	27	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment ≤ 1 dB [Sample Length : 1m Tensile Force : 4.9N]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment ≤ 1 dB [in Conformity to the JIS C 6861]	N·m	—	—	—

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.



**Single Mode Fiber:
633 - 780 nm**



Description

Thorlabs' specialty single mode fibers are engineered for a variety of applications including biotechnology, laser delivery, and telecommunications. These fibers offer enhanced bend-insensitivity as well as reduced splice loss while providing excellent resistance to bend induced loss similar to that of conventional type fibers.

Specifications

Geometrical & Mechanical	
Cladding Diameter	125 ± 1 µm
Coating Diameter	245 ± 15 µm
Core-Cladding Concentricity	≤1.0 µm
Coating / Clad Offset	≤5 µm
Coating Material	Dual Acrylate
Proof Test Level	1% (100 kpsi)
Operating Temperature	-55 to 85 °C

Optical	
Numerical Aperture (Nominal)	0.10 - 0.14
Attenuation ¹	≤15 dB/km
Operating Wavelength ²	633 - 780 nm
Cut-Off Wavelength	500 - 600 nm
Mode Field Diameter ³	3.6 - 5.3 µm @ 633 nm



¹Attenuation is a worst-case value, quoted for the shortest design wavelength.

²The wavelength range is the spectral region between the cutoff wavelength and the bend edge, in which the fiber transmits the TEM₀₀ mode with low attenuation. For this fiber, the bend edge wavelength is typically 200 nm longer than the cut-off wavelength. At the operating wavelengths between 633 nm and 780 nm, the launched power must be considered carefully as these fibers have germanosilicate cores and as such as susceptible to color center generation.

³The Mode Field Diameter is a nominal, calculated value, estimated at the operating wavelength(s) using typical value of numerical aperture and cut-off wavelength.

Specifications Subject
to Change without Notice

October 15, 2019
12606-S01, Rev F

www.thorlabs.com/contact

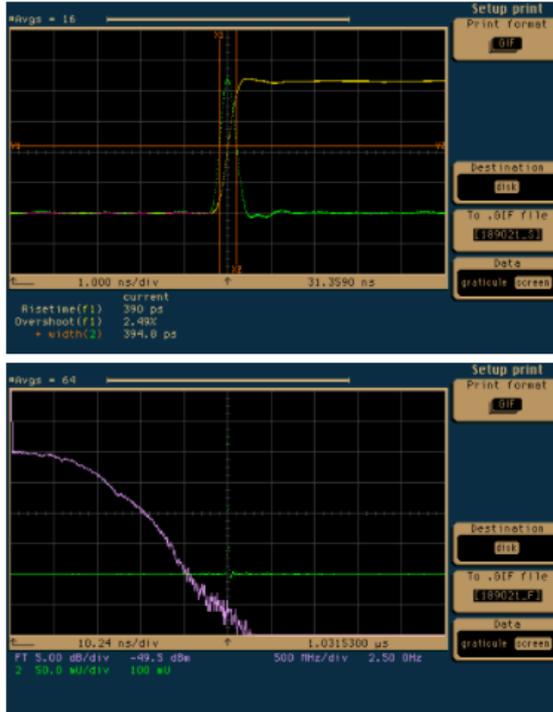


Performance Data Sheet

(SA2_189021_650nm_ST_SMAJ.doc)

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: 5dB Electrical / 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

Model Type: SPD-2 (650nm version)

Serial Number: 153819 (ST Optical Connector, SMAJ_Electrical_Connector)

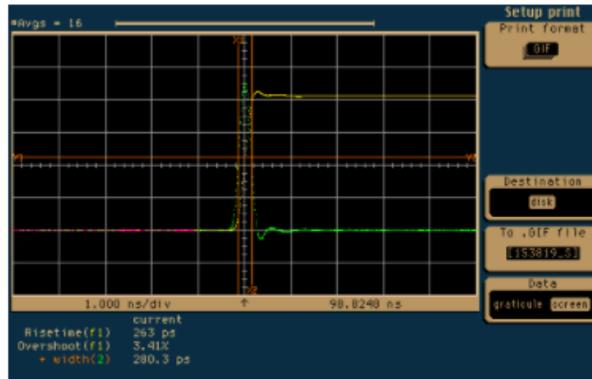


Fig.1
Impulse & Step Response

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)

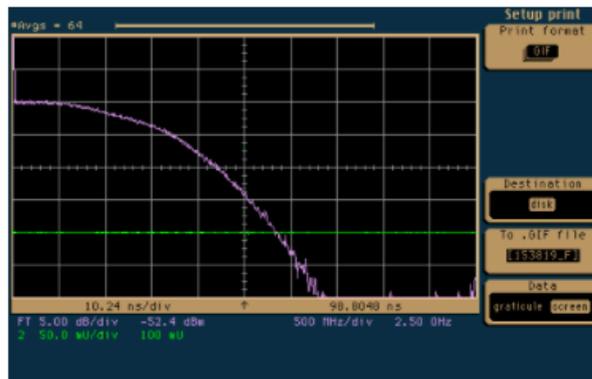


Fig.2 Frequency Response
(Calculated from the impulse response shown above)

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 <u>658nm</u> (800um GI Fiber, NA = 0.2)	900 to 1100 V/W	983 V/W	OK
Conversion Gain at <u>658nm</u> (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

ANEXO II. ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON FIBRA MC-POF SH1009

Con el fin de determinar de una manera más genérica las propiedades de las MC-POF, se repite el estudio de manera más breve para analizar las propiedades obtenidas con la MC-POF SMCK-1000P. La fibra seleccionada es un tramo de 10 metros de SH1009 de Mitsubishi. Se trata de una fibra óptica de plástico multinúcleo con 9 núcleos individuales, de tipo bantel. En la **Figura II.1** podemos observar dos imágenes de esta fibra, tomadas con los microscopios del sistema de inyección.

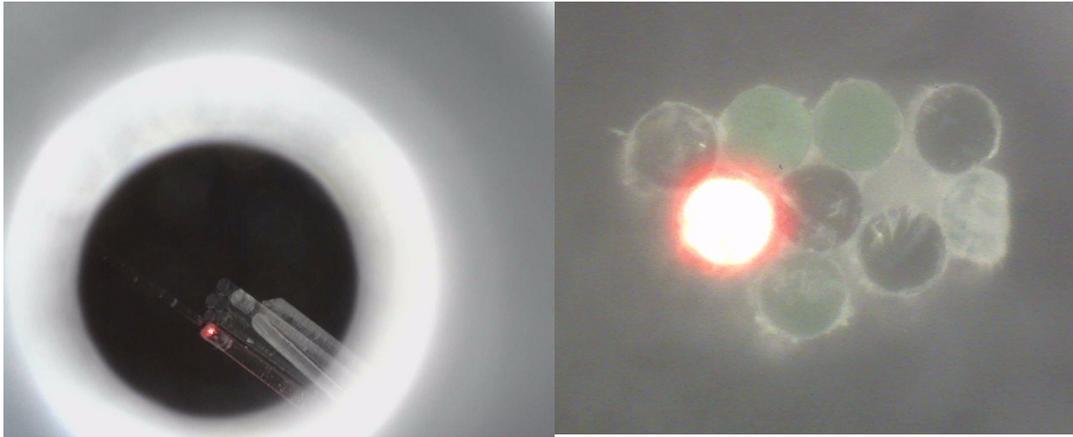


Figura II. 1. Imágenes tomadas por las cámaras del sistema de inyección: extremo inyección (izquierda) y extremo salida SH1009 (derecha).

Las medidas se han realizado con una corriente de polarización de 80 mA y 25°C de temperatura de operación. Cabe destacar, que la ausencia del material necesario para preparar este tipo de fibras, impidiendo obtener resultados precisos que nos lleven a elaborar un estudio detallado.

II.1. POTENCIA TRANSMITIDA

Se ha representado la medida de la potencia a salida de cada núcleo, así como la atenuación relativa entre núcleos.

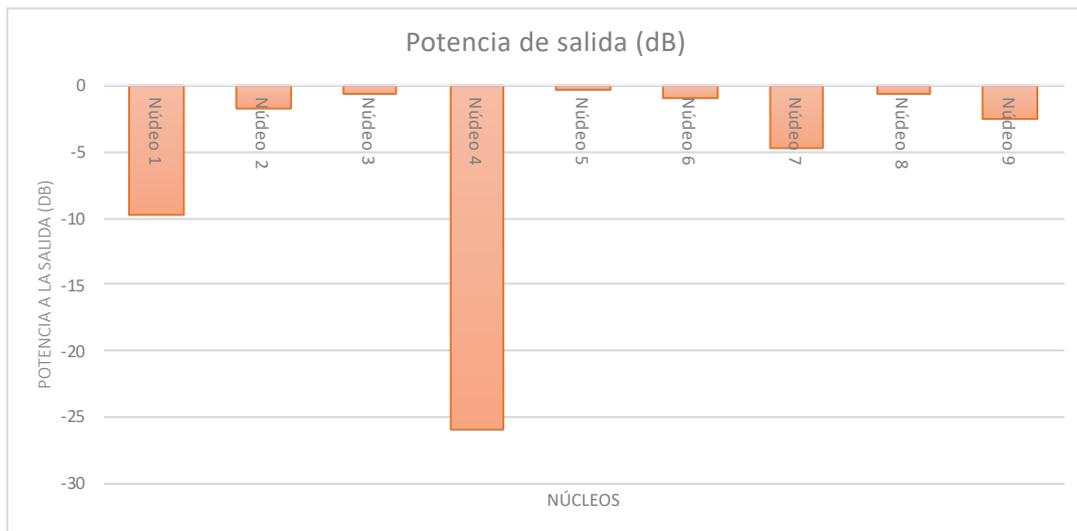


Figura II. 2. Potencia a la salida de cada núcleo de la SH1009

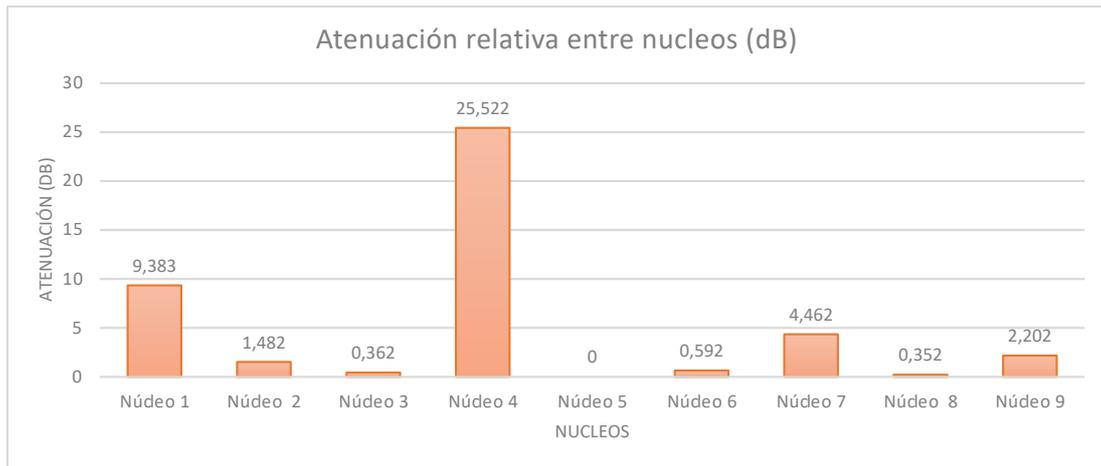


Figura II. 3. Atenuación relativa entre núcleos de SH1009 de 10m.

La diferencia de atenuación entre núcleos es elevada para el caso concreto del núcleo 4, debido a un mal corte. Es por ello, que, a pesar de haber realizado la mayoría de las medidas para todos los núcleos, a la hora de analizar los resultados no se tendrá en cuenta el núcleo 4.

II.2. DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD

El siguiente paso ha sido realizar medidas de campo lejano, para observar el comportamiento de la luz a lo largo de la fibra. Representamos las medidas de distribución de intensidad y EAF en función del ángulo de salida.

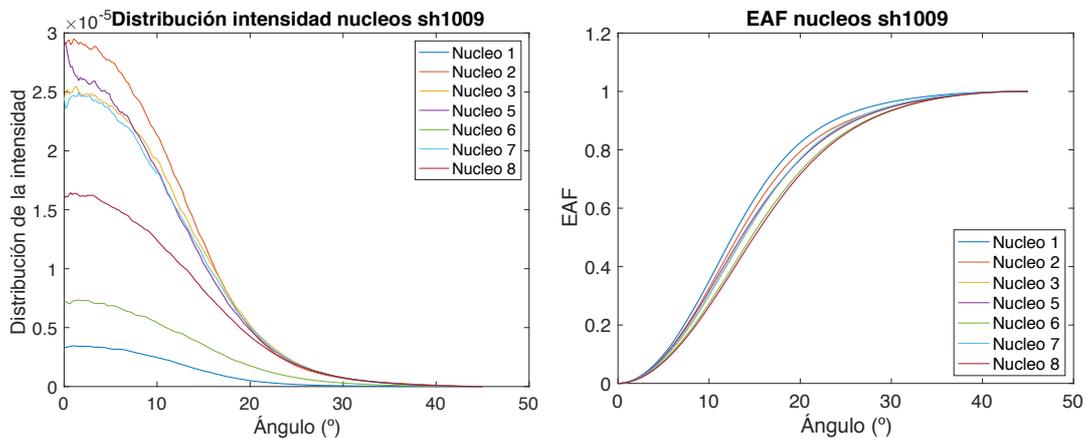


Figura II. 4. Distribución de intensidad y EAF en función del ángulo de salida para 8 de los 9 núcleos de la SH1009.

En la **Figura II.5** se muestra la desviación y media de las medidas de campo lejano realizadas para todos los núcleos. Dado que se ha considerado para estos valores el núcleo 4, cabe esperar que la desviación aumente notablemente.

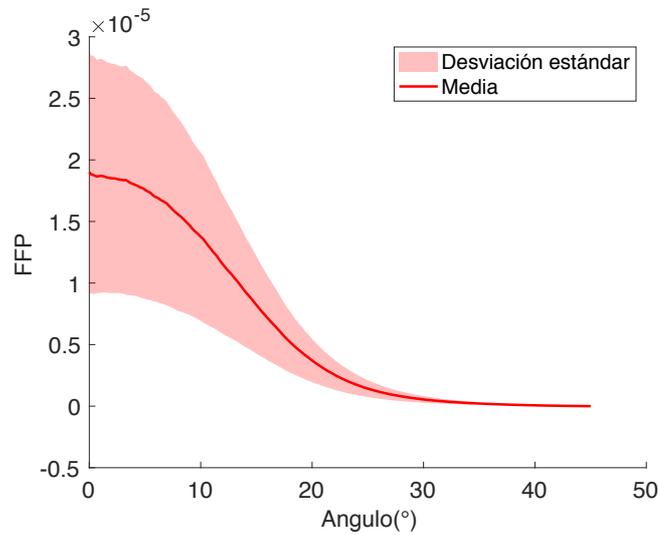


Figura II. 5. Media y desviación estándar de las medidas de campo lejano para todos los núcleos de la SH1009.

Por último, se compara el valor de apertura numérica de cada núcleo con la potencia de salida medida, para comprobar si existe dependencia en ellas.

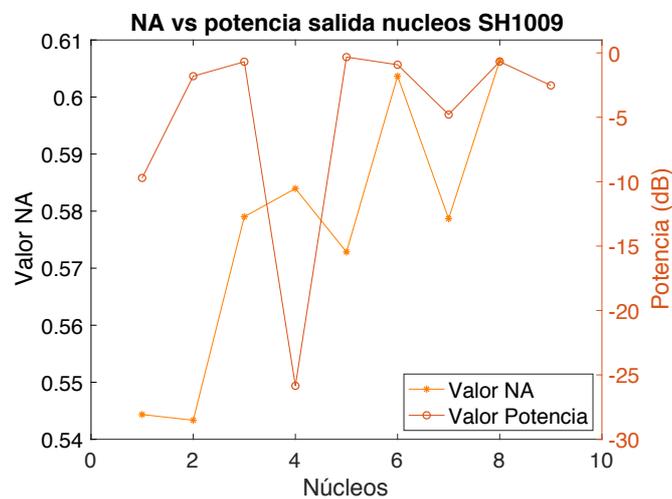


Figura II. 6. Comparación NA con la potencia de salida núcleo a núcleo de la SH1009.

Obtenemos un valor de apertura numérica entorno a 0.58-0.61, desechando el valor obtenido para el núcleo 4. Además, al tratarse de una fibra tipo 'bantel', se ha querido comprobar si la apertura numérica tiene dependencia con la potencia óptica a la salida de ella. Observando la Figura I.6 no podemos afirmar dicha correlación.

II.3. RESPUESTA FRECUENCIAL

Finalmente, se ha medido la respuesta en frecuencia por cada núcleo.

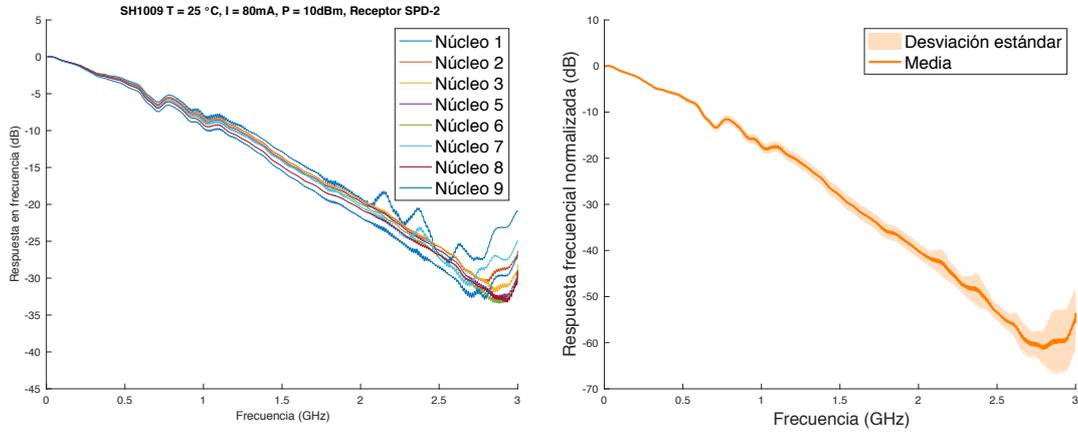


Figura II. 7. Respuesta frecuencial normalizada para todos los núcleos de la SH1009.

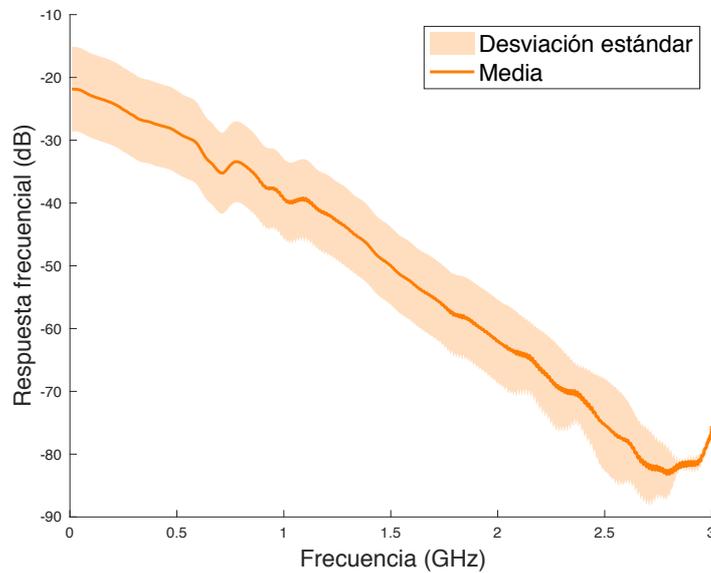


Figura II. 8. Media y desviación típica de la respuesta frecuencial de todos los núcleos de la SH1009.

Podemos observar, que la forma de las respuestas en frecuencia es similar en todos los núcleos, siendo la mayor diferencia la potencia óptica a la salida de estos.

ANEXO III. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DETECTORES SPD-2 Y SPA-2

Para seleccionar qué detector es más apropiado utilizar, se han tomado y comparado las medidas de respuesta en frecuencia para dos núcleos de la SMCK 1000P de 84 metros, y varios de la SH1009, con los dos detectores disponibles. Todas las medidas se han realizado trabajando con una corriente de polarización de 80 mA, una temperatura de operación de 25º y una amplitud de modulación de 10 dBm.

III.1. COMPARACIÓN DETECTORES CON SMCK-1000P

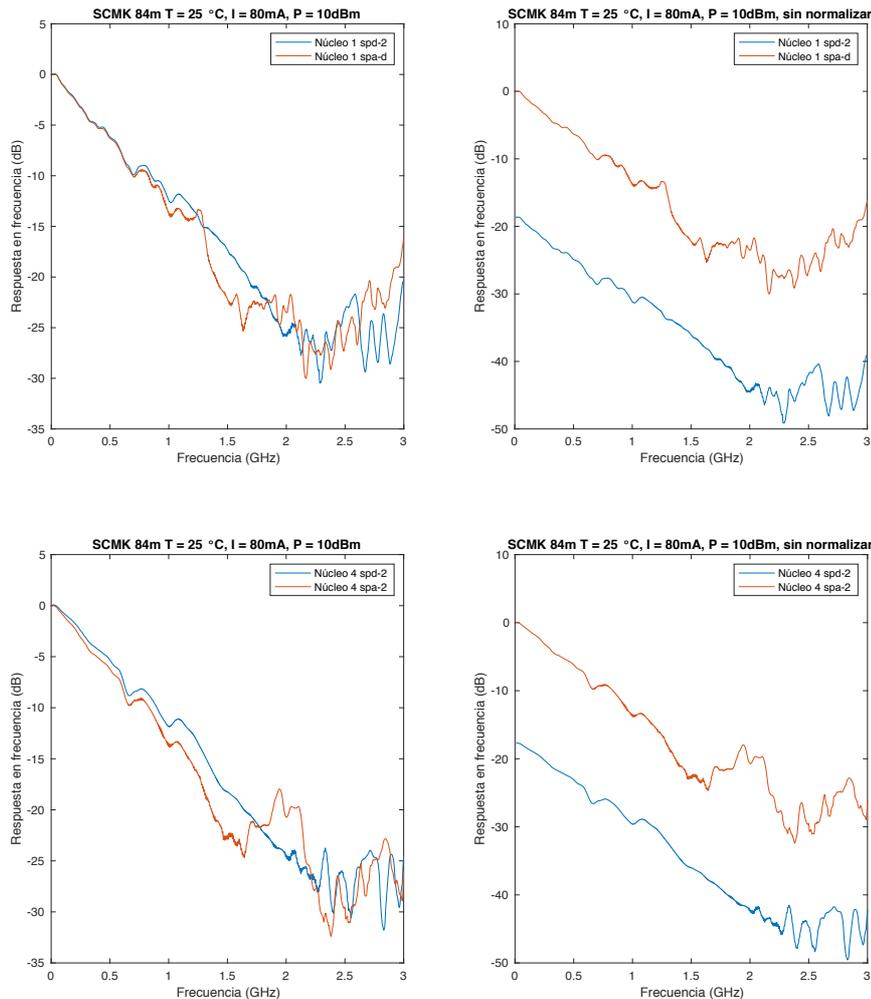


Figura III. 1. Respuestas frecuenciales para dos núcleos de la SMCK de 84 metros con SPD-2 y SPA-2.

En el caso de utilizar la SMCK los resultados obtenidos para ambos detectores son similares en cuanto a ancho de banda. Sin embargo, los resultados que se han tomado con el detector SPD-2 presentan potencias más bajas.

III.2. COMPARACIÓN DETECTORES CON SH1009

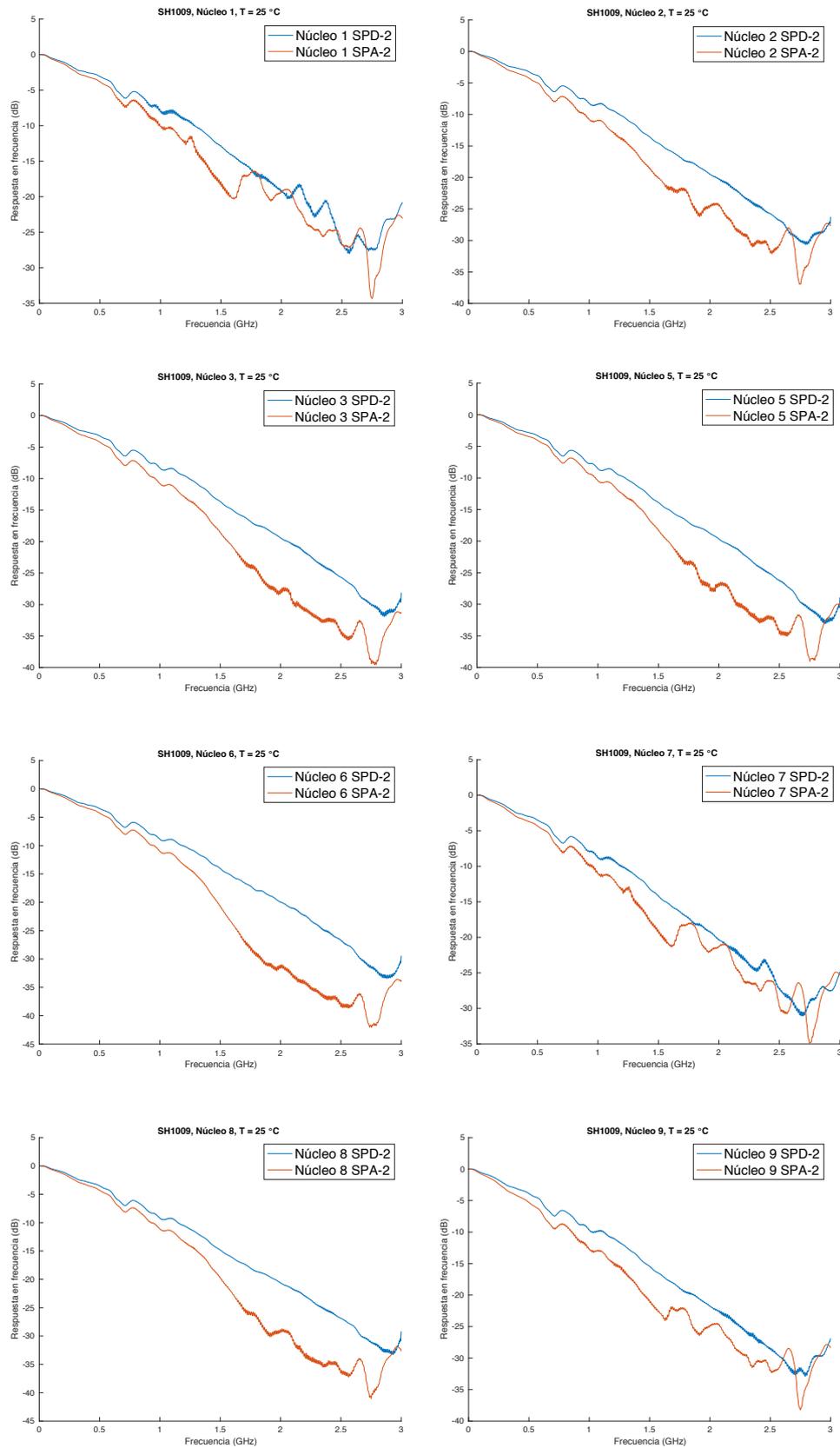


Figura III. 2. Respuestas en frecuencia normalizadas para todos los núcleos con los dos detectores disponibles en el laboratorio.

Con la fibra SH1009 de 9 núcleos, se comprueba que con el detector SPD-2 se obtiene una potencia menor respecto al SPA-2, pero se traduce en un mejor ancho de banda. Es por ello, que se ha decidido utilizar el detector SPD-2, prefiriendo mejor ancho de banda que mejor potencia óptica recibida.

ANEXO IV. COMPARACIÓN DIAGRAMAS DE OJO PARA DISTINTAS POFs DE LA MISMA LONGITUD

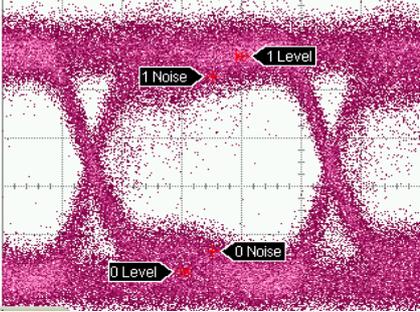
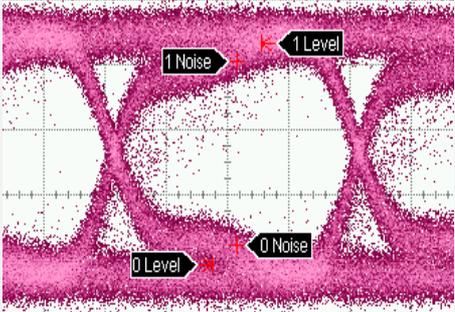
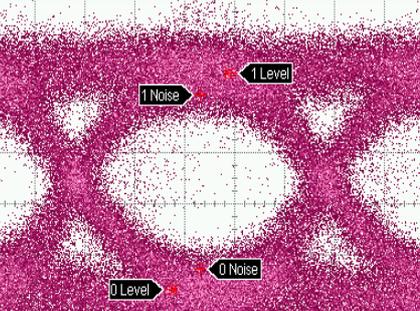
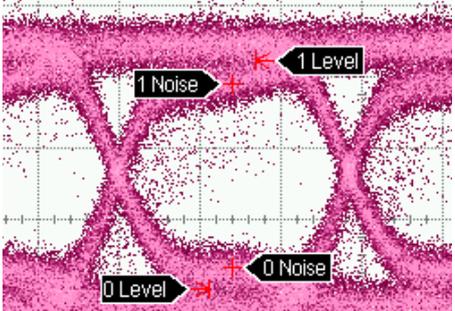
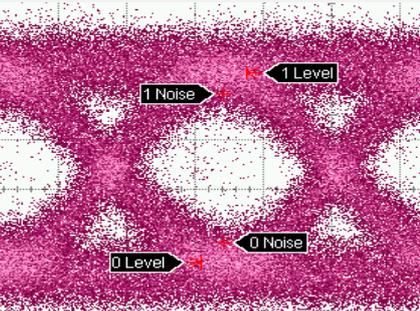
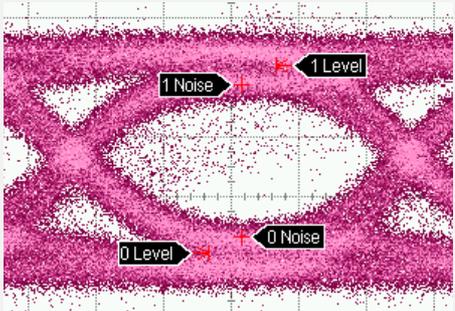
Segmentos de 50 m POFs	GI-POF	SMCK – n6
500 Mb/s	 <p>Amplitud ojo: 52.53 – 26.15 mV</p>	 <p>Amplitud ojo: 333.09 – 160.52 mV</p>
700 Mb/s	 <p>Amplitud ojo: 51.77 – 26.82 mV</p>	 <p>Amplitud ojo: 328.06 – 164.64mV</p>
1000 Mb/s	 <p>Amplitud ojo: 50.46 – 27.91 mV</p>	 <p>Amplitud ojo: 326.12 – 165.98 mV</p>

Tabla IV. 1. Diagramas de ojo para GI-POF y SMCK-1000P (núcleo 6), para tres tasas de transmisión distintas.

ANEXO V. CAMBIO DE COMPORTAMIENTO DE LA FUENTE ÓPTICA

Debido al comportamiento observado en las medidas de BER y la detección de la existencia de un ruido que creemos puede ser causado por una retroalimentación de potencia óptica a través del raballo del láser, se decidió repetir las medidas de respuesta frecuencial del sistema B2B, para estimar las limitaciones de ancho de banda impuestas por el conjunto del transmisor y el receptor. Las medidas se realizaron con las dos fibras cortas que se emplearon en las medidas B2B de BER: BH y MH. De nuevo, al igual que las medidas del apartado 3.1.2, la respuesta frecuencial se obtuvo para varios valores de intensidad de corriente de polarización manteniendo fija la temperatura a 25 °C (resistencia del termistor configurada a 10 k Ω).

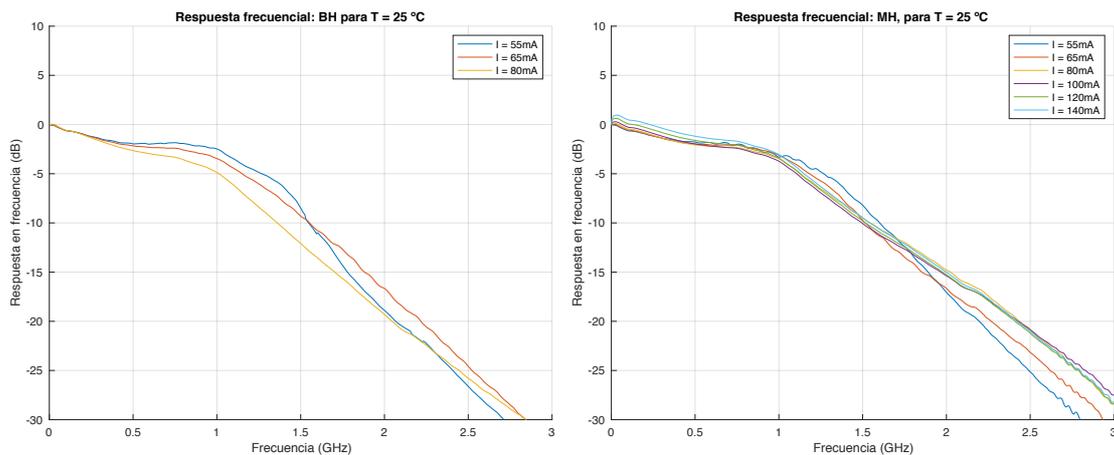


Figura V. 1. Respuesta frecuencial para los dos tramos de POF, BH (izquierda) y MH (derecha), en función de la corriente de polarización.

En la **Figura V.1** se representa la respuesta en frecuencia normalizada para distintas intensidades de corriente. Comparando estos resultados con los de la **Figura 3.2**, se puede apreciar un cambio en el comportamiento de la respuesta frecuencial ante las variaciones de intensidad del láser.

Además de la medida de la respuesta frecuencial B2B, tras notar que se han producido cambios en la misma, se ha repetido el estudio frecuencial de la fibra para un número limitado de núcleos. Estas medidas se han realizado para un tramo corto de SMCK (5 metros) que utilizaremos como referencia, considerándose como buena aproximación para caracterizar la respuesta de la propia electrónica del sistema y para los segmentos de 50 y 84 metros, dado que los resultados para 10 m y 5 m eran similares. En este caso, las medidas se realizan para 5 núcleos; el central, dos de la primera corona (núcleos 2 y 6), y dos de la segunda (núcleos 8 y 15), tomándose estos núcleos estratégicamente según su posición dentro de la geometría de la MC-POF.

Para llevar a cabo las medidas se ha fijado la corriente de polarización a 65 mA, evitando que sature el detector, la temperatura de operación a 25 °C y la potencia de RF del VNA a 0 dBm, debido a que 10 dBm suponía salir fuera de la zona de operación lineal del láser.

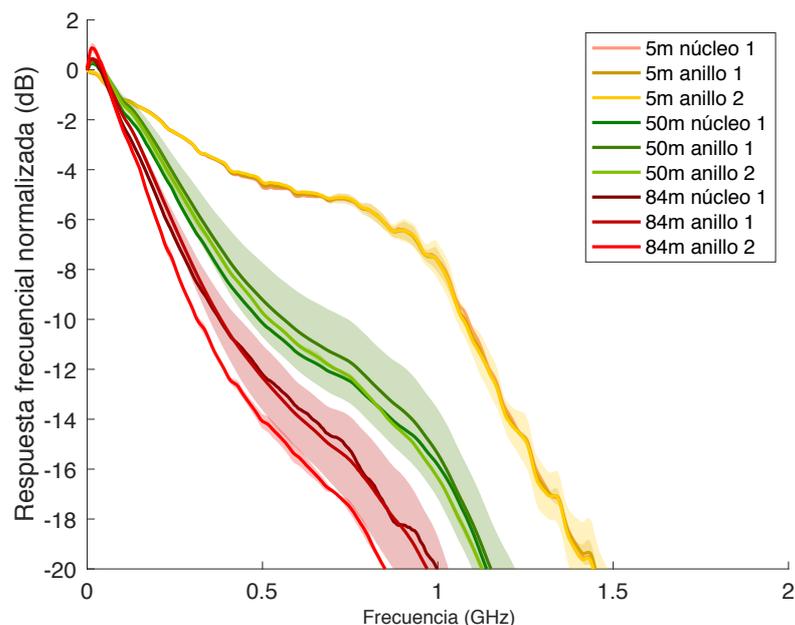


Figura V. 2. Respuesta frecuencial del sistema normalizada de enlaces de distinta longitud a través de cada uno de los núcleos tras el cambio en el comportamiento del láser.

A simple vista, en la **Figura V.2** se puede observar que las oscilaciones que aparecían en todas las medidas de respuesta frecuencial han desaparecido. Además, se ha vuelto a comprobar si ahora la respuesta en frecuencia si varía al modificar la corriente de polarización. Sin embargo, la respuesta en frecuencia decae mucho más rápido que en caso anterior, lo que supone un peor ancho de banda en transmisión.

Así pues, estas medidas parecen indicar que la colocación del rabillo que minimiza la potencia de ruido del láser y por tanto hace posible la transmisión a través de los núcleos de MC-POF con calidad razonable empeora el ancho de banda del sistema.

Sin duda este efecto y el fenómeno que causa la aparición de dicho ruido deben ser estudiados en mayor profundidad para entender mejor cómo interactúan.

