



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Caracterización experimental de las propiedades de transmisión en fibras ópticas de plástico de índice gradual (GI-POF)

Experimental characterization of the transmission properties in graded-index plastic optical fibers (GI-POF)

Autora

Estela Laporta Puyal

Directora

Alicia López Lucia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Estela Laporta Puyal,

con nº de DNI 73212771E en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado _____, (Título del Trabajo)

Caracterización experimental de las propiedades de transmisión en fibras ópticas de plástico de índice gradual (GI-POF).

_____ es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 1 de septiembre de 2016

Fdo: Estela Laporta Puyal

Agradecimientos

A mi familia, por todo el apoyo y fuerza que me dan día tras día.

A Alejandro, por confiar siempre en mí. Por disfrutar conmigo de este camino y levantarme siempre que me he caído.

A mis amigas de siempre, porque a pesar de la distancia siempre están cerca, y a mis amigos de clase, por todos los buenos momentos que hemos compartido.

A los profesores del grupo de POF, en especial a Alicia, por todo lo que me ha enseñado y aconsejado desde el primer día y a mis compañeros de laboratorio que han sido una gran ayuda.

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO DE ÍNDICE GRADUAL (GI-POF)

Resumen

El proyecto desarrollado en esta memoria se enmarca dentro de la línea de trabajo de caracterización experimental de fibras ópticas de plástico (POF) que se lleva a cabo en el grupo de POF de la Universidad de Zaragoza. El eje central del trabajo es la fibra óptica de plástico de índice gradual (GI-POF), ya que hasta la actualidad no se han analizado sus propiedades en profundidad. Por ello, el objetivo de este trabajo es realizar una caracterización experimental completa de los parámetros de transmisión propios de este tipo de fibra que dote al grupo de un conocimiento más detallado de ella, a la vez que permita obtener un modelo teórico en el futuro.

Dentro del conjunto de medidas a realizar, en primer lugar se obtiene la atenuación espectral en diferentes longitudes y se compara con el tipo de fibra de plástico más extendida, la de salto de índice (SI-POF). Los resultados obtenidos demuestran que la GI-POF presenta aproximadamente el doble de atenuación que la SI-POF. Seguidamente el trabajo se centra en la obtención de la respuesta frecuencial y del ancho de banda en función de la longitud. Para llevar a cabo esta parte es necesario realizar un estudio previo del montaje experimental, tanto de su distribución como de sus elementos para establecer una configuración que permita obtener los mejores resultados en un amplio rango de frecuencias. Las medidas obtenidas permiten apreciar que la GI-POF presenta un ancho de banda notablemente mayor que el presentado por la SI-POF. Además, se ha observado una gran variabilidad en ellas lo que nos ha llevado a estudiar la dependencia con las condiciones de inyección. En este sentido, se han tenido en cuenta los efectos del pulido, la inyección mediante otro tramo de fibra y el uso de un mezclador de modos o *scrambler*. En la última fase de la caracterización se han realizado las medidas del campo lejano para analizar la distribución espacial de potencia óptica a la salida de la fibra según su longitud. Esta parte del trabajo permite conocer cómo se propaga la luz a través de la fibra y con ello dar explicación a los resultados obtenidos en la caracterización de las respuestas frecuenciales.

Para concluir el trabajo se ha establecido en el laboratorio un enlace de POF con dispositivos comercializados para dicho fin y se ha medido la tasa de error binario (BER, *Bit Error Rate*), la cual nos permite verificar las buenas prestaciones en cuanto a ancho de banda de la fibra estudiada. Como conclusión general de este trabajo podemos afirmar que en los escenarios actuales los enlaces basados en GI-POF tienen limitada su longitud principalmente por atenuación. Sin embargo, es previsible que en un futuro próximo surjan aplicaciones en las que esta fibra encuentre un segmento de mercado.

Índice de contenidos

1. Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.3 Organización de la memoria.....	2
2. Fundamentos teóricos	5
2.1 Evolución de la fibra óptica.....	5
2.2 Características de la POF	5
2.2.1 SI-POF	7
2.2.2 GI-POF	8
2.3 Ventajas de la POF y aplicaciones	8
3. Metodología	10
3.1 Medida de la atenuación espectral.....	10
3.1.1 Descripción del sistema.....	11
3.1.2 Procedimiento de medida.....	11
3.2 Medida de las respuestas frecuenciales.....	12
3.2.1. Descripción del sistema.....	12
3.2.2 Procedimiento de medida.....	17
3.2.3. Problemática y optimización de parámetros.....	18
3.3 Medidas de campo lejano	19
3.3.1 Descripción del sistema.....	19
4. Resultados experimentales.....	22
4.1 Atenuación espectral	22
4.1.1 Comparación con SI-POF	23
4.2 Respuesta frecuencial.....	24
4.2.1 Comparación con SI-POF	25
4.2.2 Estudio de las condiciones de inyección.....	26
4.2.3 Estudio de la variabilidad.....	30
4.3 Medidas de campo lejano.....	31
4.3.1 Barridos angulares.....	32

4.3.2	Perfiles radiales.....	37
4.3.2.1	Influencia de las condiciones de inyección.....	37
4.4	Ejemplo de aplicación. Análisis del BER.....	38
5.	Conclusiones y líneas futuras.....	41
5.1	Conclusiones.....	41
5.2	Líneas futuras.....	42
	Referencias.....	43
	ANEXO I. Parámetros de transmisión.....	46
	ANEXO II. Fundamentos de los componentes del sistema de medida de respuesta frecuencial.....	49
	ANEXO III. Configuración del sistema de medida de respuesta frecuencial.	52
	ANEXO IV. Preparación de los extremos de POF.....	59
	ANEXO V. Software utilizado.....	60
	ANEXO VI. Hojas de características.....	63
	ANEXO VII. Diagrama de Gantt	79

Índice de figuras y tablas

Figura 2. 1 Estructura de la fibra óptica.....	6
Figura 2. 2 Tipos de POF en función de su perfil de índice [15].....	7
Figura 2. 3 Representación de la propagación de la luz en una fibra óptica de salto de índice [18].....	7
Figura 2. 4 Representación de la propagación de la luz en una fibra óptica de índice gradual [18].....	8
Figura 3. 1 Esquema del sistema utilizado para la medida de la atenuación espectral	11
Figura 3. 2 Esquemático del sistema utilizado para medir la respuesta frecuencial de la fibra.....	12
Figura 3. 3 Curva I-P del diodo láser DL-5147-042 medida experimentalmente.	14
Figura 3. 4 Respuesta frecuencial de la base moduladora LDM9T/M proporcionada por el fabricante.	15
Figura 3. 5 Curva de ganancia del amplificador ZKL-1R5+.....	16
Figura 3. 6 Curva de ganancia del amplificador ZKL-2R5+.....	16
Figura 3. 7 Esquemático del sistema experimental utilizado para medir patrones de campo lejano.	19
Figura 3. 8 Bloque de inyección para realizar barridos angulares.	20
Figura 3. 9 Ejemplo de la matriz de un barrido angular.	21
Figura 3. 10 Bloque de inyección para medir perfiles radiales.	21
Figura 4. 1 Comparación de la atenuación espectral de varias longitudes de GI-POF OM-GIGA SE100.	23
Figura 4. 2 Comparación de la atenuación espectral de tres longitudes de SI-POF modelo HFBR de Avago.	23
Figura 4. 3 Comparación de las respuestas frecuenciales normalizadas de varias longitudes de GI-POF.	25
Figura 4. 4 Comparación de las respuestas frecuenciales de GI-POF (OM-Giga) y SI-POF (HP).	26
Figura 4. 5 Comparación de la respuesta frecuencial con 25 metros. Izquierda: Inyección directa con láser altamente elíptico, UFL. Derecha: Inyección uniforme con un tramo corto de SI-POF, OFL.	27

Figura 4. 6 Comparación de la respuesta frecuencial con 50 metros. Izquierda: Inyección directa con láser altamente elíptico, UFL. Derecha: Inyección uniforme con un tramo corto de SI-POF, OFL.	28
Figura 4. 7 Comparación de la respuesta frecuencial con 75 metros. Izquierda: Inyección directa con láser altamente elíptico, UFL. Derecha: Inyección uniforme con un tramo corto de SI-POF, OFL.	28
Figura 4. 8 Scrambler.	29
Figura 4. 9 Comparación de respuestas frecuenciales con scrambler en emisión, detección y sin él.	29
Figura 4. 10 Variabilidad según las condiciones de inyección de arriba a abajo y de izquierda a derecha: Inyección directa, Inyección con SI-POF, Pulido e inyección directa, Pulido e inyección con SI-POF.....	30
Figura 4. 11 Comparación de barridos angulares de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 1, 2.5, 10 y 25 metros de GI-POF.	32
Figura 4. 12 Comportamiento del ángulo de aceptación en función del índice de refracción [18].	32
Figura 4. 13 Comparación de superposición de barridos angulares de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 1, 2.5, 10 y 25 metros de GI-POF.	33
Figura 4. 14 Comparación de la anchura a media altura de los barridos de 25, 10, 2.5 y 1 metro de GI-POF.	34
Figura 4. 15 Comparación de barridos angulares de SI-POF de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 1.25, 5, 10 y 30 metros.	35
Figura 4. 16 Comparación de barridos angulares de GI-POF de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 25 m pulido, 25 m corte, 75 m pulido y 75 m corte.	36
Figura 4. 17 Comparación de medidas aplicando pulido y cortes con inyección directa UFL o inyección con SI-POF OFL. Izquierda: 25 metros, Derecha: 75 metros.	37
Figura 4. 18 Sistema experimental utilizado para medir el BER [26].	38
Figura 4. 19 Diagramas de ojo en 50 metros. Izquierda: Tasa de transmisión 1200 Mb/s. Derecha: Tasa de transmisión 1750 Mb/s.	39
Figura 4. 20 Medida del BER en 25 y 50 metros de GI-POF.	39
Figura I. 1. Atenuaciones espectrales de distintos tipos de fibras ópticas [18].....	47
Figura I. 2 Efecto de la dispersión en la fibra [18]......	47
Figura II. 1 Distribución de las ondas de potencia de entrada y salida de una red de dos puertos.	49
Figura II. 2 Curva I-P general de un diodo láser.....	50

Figura III. 1 Esquemático del sistema experimental para llevar a cabo el método de barrido de tonos.	53
Figura III. 2 Comparación de las interferencias antes y después de optimizar la configuración.....	55
Figura III. 3 Comparación de la respuesta frecuencial de la referencia para distintas potencias de RF.	58
Figura IV. 1 Cortadora Fiber Cutter para POF.	59
Figura IV. 2 Peladora Micro-Strip para POF.	59
Figura V. 1 Programa Lockinserver.exe.....	60
Figura V. 2 Entorno medida atenuación espectral.	60
Figura V. 3 Entorno de medida de las respuestas frecuenciales.	61
Figura V. 4 Entorno de medida del campo lejano.	61
Figura V. 5 Entorno de medida del BER.	62
Tabla 3. 1 Comparación de los amplificadores ZKL-1R5+ y ZKL-2R5+.....	16
Tabla 3. 2 Resumen de los parámetros óptimos del sistema.	18
Tabla 4. 1 Resumen de los efectos provocados en cada condición de inyección.	31

1. Introducción

1.1 Motivación

De todos los medios de comunicaciones guiados la fibra óptica es uno de los más utilizados gracias a sus buenas propiedades de transmisión además de ciertas ventajas añadidas como inmunidad a interferencias electromagnéticas o bajo peso. Dependiendo del material del que se fabriquen existen distintos tipos siendo los más destacados la fibra óptica de vidrio (GOF, *Glass Optical Fiber*) y la fibra óptica de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*). En las últimas décadas la fibra óptica de vidrio ha generado gran interés ya que ha hecho posible las comunicaciones a largas distancias y con tasas de transmisión no alcanzadas por ningún otro medio [1]. Sin embargo, las excepcionales prestaciones de esta fibra no son imprescindibles en las distancias cortas (decenas de metros), donde la fibra óptica de plástico aporta numerosas ventajas que la han elevado al medio de transmisión preferido para este tipo de escenarios [2]. Debido a su extendido uso, las fibras ópticas de vidrio están ampliamente estudiadas y caracterizadas. Sin embargo, las fibras ópticas de plástico se encuentran mucho menos estudiadas, siendo necesario caracterizarlas experimentalmente para conocer su comportamiento. Los estudios realizados sobre este tipo de fibras muestran que tienen peores prestaciones de transmisión en comparación con las de vidrio, sin embargo, ventajas como su facilidad de instalación o bajo coste de los dispositivos hacen que sea un medio muy adecuado para enlaces de corto alcance [3]. Por este motivo se han ido sucediendo modificaciones en la geometría y los materiales para mejorar sus características y hacer que su uso sea mucho más eficiente. Del mismo modo, han ido surgiendo entornos de aplicación de la POF como medio transmisión, principalmente en redes de corto alcance y requerimientos moderados de ancho de banda, como son redes de datos en automóviles, redes domésticas o redes en el interior de aviones.

Este trabajo se enmarca dentro de la investigación de fibras ópticas de plástico que se desarrolla en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de Zaragoza. El grupo de investigación en POF tiene una amplia experiencia desarrollando modelos de propagación [4], entornos de simulación, sistemas de caracterización y en el diseño de redes de comunicaciones basadas en POF [5, 6]. Hasta ahora la mayoría de los estudios realizados se han centrado en la fibra de plástico de salto de índice (SI-POF). Sin embargo, existen otros tipos de fibra que presentan modificaciones de su perfil de índice de refracción mejorando algunas de sus propiedades de transmisión y que no han sido analizados en profundidad por el grupo de POF. Este es el caso de la fibra de plástico de índice gradual (GI-POF), que introduce mejoras significativas en cuanto a ancho de banda frente a la de salto de índice [7]. Por este motivo, en este trabajo se busca realizar una caracterización completa de sus propiedades de transmisión.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en realizar una caracterización experimental completa de la fibra óptica de plástico de índice gradual a partir de la cual sea posible obtener un modelo teórico que permita estimar sus prestaciones en distintos escenarios de aplicación. La característica principal que muestra esta fibra es su mayor capacidad de transmisión frente a su predecesora, la fibra de salto de índice, por lo que el estudio realizado se centra en gran parte en cuantificar la mejora de este parámetro. Por el contrario, este tipo de fibra presenta peores características en cuanto a atenuación, lo que combinado con el buen ancho de banda que exhibe dificultará la toma de medidas.

El conjunto de medidas que se van a abordar incluyen la caracterización de la atenuación espectral, la respuesta frecuencial y el campo lejano. Estos parámetros serán comparados con los obtenidos con una fibra de salto de índice para comprobar sus diferencias. Para cada una de las medidas se dispondrá de tramos de fibra de diferente longitud con el fin de analizar el comportamiento en función de ésta. También se va a realizar un análisis de la dependencia con las condiciones de inyección. Éstas tienen notable importancia al tratar con fibras de plástico, ya que en la mayoría de ocasiones los enlaces de POF tienen una longitud menor que la necesaria para alcanzar el equilibrio modal.

1.3 Organización de la memoria

La memoria presentada se estructura en diferentes capítulos complementados por varios anexos. A continuación se detalla el contenido de los capítulos y anexos:

- Capítulo 1: Introducción

Se plantea el contexto del trabajo, la motivación e interés general del proyecto y los objetivos del mismo. Además se describe la organización de la memoria y el contenido de cada capítulo.

- Capítulo 2: Fundamentos teóricos

Se describe la evolución de la fibra óptica de plástico hasta la actualidad. Se define su estructura geométrica y se clasifican en función de los modos que pueden viajar en ellas. A continuación se definen los tipos de POF más importantes que existen en función de su perfil de índice de refracción y por último, las ventajas de trabajar con fibra óptica de plástico así como algunas de sus aplicaciones.

- Capítulo 3: Metodología

Este capítulo se divide en tres apartados: medida de la atenuación espectral, medida de la respuesta frecuencial y medida de campo lejano. Se corresponden a los tres tipos de medidas realizados para la caracterización de la fibra óptica de plástico de índice gradual. En cada uno de ellos se describe el sistema utilizado, los elementos de los que se compone y el procedimiento de medida. En el caso de la medida de respuestas frecuenciales se hace más hincapié en el análisis de sus elementos ya que este sistema es menos maduro y como se comprobará es necesario estudiar los elementos utilizados y sus parámetros para optimizar las medidas.

- Capítulo 4: Medidas experimentales

Se analizan los resultados correspondientes a los tres apartados descritos en el capítulo 3 de metodología. Para contrastar el comportamiento de la fibra de índice gradual y demostrar que su comportamiento es particular, todas las medidas se comparan con la fibra óptica de plástico de salto de índice por ser la más habitual. Además en el apartado de respuestas frecuenciales y medidas de campo lejano se estudia la influencia de las condiciones de inyección así como del estado de la superficie de la fibra. Por último se detalla un ejemplo de aplicación donde se comprueban los resultados obtenidos en un sistema de comunicaciones real que mide la tasa de error binario.

- Capítulo 5: Conclusiones

Se realiza un análisis de todo el trabajo realizado, se extraen conclusiones del mismo y se hace una valoración explicando las aportaciones. Además se comentan las posibles líneas futuras de trabajo a seguir después de este estudio.

- Anexo I. Parámetros de transmisión

Se explican detalladamente los parámetros de transmisión que se analizan en este trabajo. Concretamente se describen la atenuación, la dispersión y el ancho de banda completando así los fundamentos teóricos del capítulo 2.

- Anexo II. Fundamentos de los componentes del sistema de medida de respuesta frecuencial.

Se explican los fundamentos teóricos de los elementos del sistema de medida de respuestas frecuenciales para completar el Capítulo 3.

- Anexo III. Configuración del sistema de medida de respuesta frecuencial.

Este anexo se detalla el proceso seguido y los experimentos de control realizados para obtener una configuración que permita realizar las medidas en un rango de frecuencias elevado. Además se calculan los parámetros óptimos que deben tener los elementos.

- Anexo IV. Preparación de los extremos de POF

Se describe los pasos a seguir para preparar los extremos de la fibra óptica así como las herramientas utilizadas para ello.

- Anexo V. Software utilizado

En este anexo se detallan los programas utilizados en cada una de las medias y se describe la interfaz gráfica de cada uno de ellos.

- Anexo VI. Hojas de características

Se incluyen las hojas de características de los dispositivos utilizados en este trabajo.

- Anexo VII. Diagrama de Gantt

Se incluye un diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Evolución de la fibra óptica

Las fibras ópticas de vidrio (GOF, *Glass Optical Fiber*) revolucionaron el mundo de las telecomunicaciones con su aparición en la segunda mitad del pasado siglo. Su enorme capacidad y su baja atenuación han hecho que sean un medio de transmisión ideal para enlaces de largo alcance que requieran gran ancho de banda [1]. Al mismo tiempo que se fueron desarrollando las fibras ópticas de vidrio, se empezaron a realizar pruebas con otro tipo de materiales con la idea de abaratar los costes dando lugar a las fibras ópticas de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*). Este desarrollo comienza en 1960 con el uso de PMMA (polimetilmetacrilato), dando lugar a fibras con unas pérdidas iniciales de 1000 dB/km. En los años siguientes se mejoró el producto logrando fibras de salto de índice PMMA con 150 dB/km en 650 nm y una tasa de transmisión de 50 Mb/s en 100 m de fibra. Debido a la atenuación que presentaban no tuvieron éxito quedándose a la sombra de la fibra de vidrio [8]. En 1990 en la universidad de Keio se desarrollaron fibras PMMA con índice gradual (GI-POF, *Graded-Index POF*) que permitían un aumento considerable del ancho de banda con respecto a la de salto de índice utilizadas hasta el momento [9, 10]. En años posteriores se han mejorado notablemente las prestaciones de la GI-POF y se ha investigado el uso de otros materiales, como es el caso de los polímeros perfluorinados, que permiten reducir las pérdidas hasta 50 dB/km para longitudes de onda en el rango de 650 nm a 1300 nm [11].

En la actualidad, la fibra óptica de plástico se ha establecido como un medio de transmisión competitivo en redes de corto alcance cuyas necesidades de tasa de transmisión son cada vez más altas, como las que se implementan en entornos domésticos o aquellos en el interior de automóviles y aviones [12]. Además, hoy en día se están investigando técnicas que permitan aprovechar al máximo las propiedades de la POF mediante el uso de esquemas de transmisión avanzados similares a los ya empleados en otros medios de transmisión (ecualización electrónica, modulaciones espectralmente eficientes,...) [13].

2.2 Características de la POF

Al igual que las fibras ópticas de vidrio, las fibras ópticas de plástico son guías de onda cilíndricas. Su comportamiento está basado en la reflexión total de las ondas electromagnéticas que ocurre en la separación de dos medios dieléctricos cuando el primero tiene un índice de refracción mayor que el segundo [14]. A grandes rasgos las principales características de la fibra óptica de plástico que la diferencian de la de vidrio son su composición, generalmente PMMA, y el tamaño de su diámetro. Son estas dos características las que restringen los ámbitos de aplicación de la POF ya que determinan

la atenuación y la apertura numérica; en definitiva, el número de modos que esta fibra es capaz de guiar.

En las fibras ópticas de plástico, la capa más interna por la que viaja la luz se llama núcleo o *core*, está fabricado por un material dieléctrico con un índice de refracción entre 1.49 y 1.59 con distintas formas de perfil mediante las que se obtienen diferentes propiedades de transmisión como veremos a continuación. El tamaño del núcleo varía entre 980 y 1000 μm , siendo entre 20 y 100 veces mayor que en las fibras de vidrio, lo que mejora sustancialmente la manejabilidad de la fibra [15]. La capa intermedia se llama revestimiento o *cladding*, con un índice de refracción menor que el núcleo para que se produzca el fenómeno de reflexión total dentro de éste. Por último, la capa más externa de la fibra es la cubierta cuya función es la de proteger a las capas anteriores y dotar de flexibilidad y resistencia a la fibra [16].

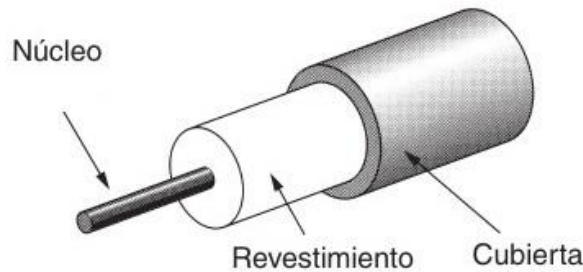


Figura 2. 1 Estructura de la fibra óptica

Desde el punto de vista de la propagación de la luz, las fibras ópticas pueden clasificarse en dos grupos: monomodo, cuando se transmite sólo el modo fundamental y multimodo, cuando se transmite más de un modo. La frontera entre ambas está determinada por la frecuencia de corte normalizada V que se define en la Ecuación (2.1):

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

donde ρ es el radio del núcleo de la fibra, λ la longitud de onda de la luz transmitida, n_{co} el índice de refracción del núcleo y n_{cl} el índice de refracción del revestimiento. Cada modo representa una solución de las ecuaciones de Maxwell. Cuando se cumple que $V > 2.405$ las ecuaciones de Maxwell tienen más de una solución y son varios los modos que se transmiten por la fibra. La POF se encuentra dentro del grupo de las fibras multimodo ya que debido a su gran tamaño y apertura numérica son capaces de transmitir millones de modos [17].

En cuanto a la atenuación, esta fibra presenta valores notablemente más elevados que los de la tradicional GOF, aproximadamente en tres órdenes de magnitud. De forma contraria a la fibra de vidrio convencional, la POF presenta mínimos en la ventana del visible lo que simplifica su uso mejorando la seguridad del instalador. En cuanto a la apertura numérica, esta es sensiblemente superior a la de las fibras de vidrio, presentando

valores del orden de 0.5 frente a los 0.17 de la GOF [18]. Esta característica, junto con el tamaño del núcleo, simplifica enormemente la inyección de luz en la POF lo que redundará en una instalación y mantenimiento menos costosos.

Hoy en día las fibras de plástico más ampliamente utilizadas son las fabricadas en PMMA. Dentro de estas fibras, existen básicamente dos tipos según el perfil de índice: SI-POF (*Step-Index* POF) y GI-POF (*Graded-Index* POF). Adicionalmente, se han desarrollado fibras con otros perfiles de índice con el objetivo de proporcionar características ventajosas en ciertos escenarios. Este es el caso de la fibra multi-núcleo (MC-POF, *Multi-core* POF) que reduce las pérdidas por curvatura y permite aumentar la capacidad de transmisión mediante la técnica de multiplexación espacial [15]. En la Figura 2.2 se muestran los perfiles de índice más utilizados.

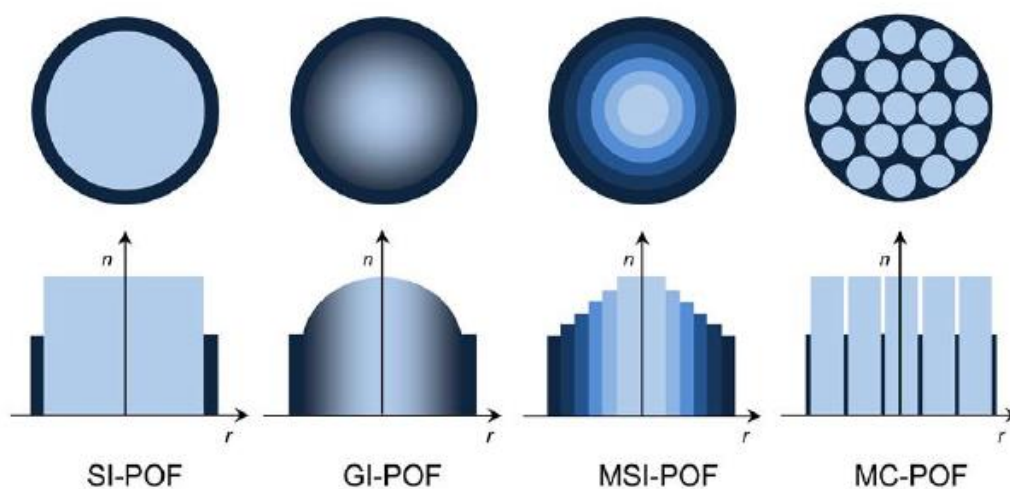


Figura 2. 2 Tipos de POF en función de su perfil de índice [15].

2.2.1 SI-POF

Este tipo de fibra está formado por un núcleo con índice de refracción homogéneo en todo el espacio, al igual que el del revestimiento, el cual siempre va a ser ligeramente inferior para que se produzca el guiado de la luz mediante el fenómeno de reflexión total. La Figura 2.3 representa de forma simplificada la forma en que la luz se propaga a través de la fibra.

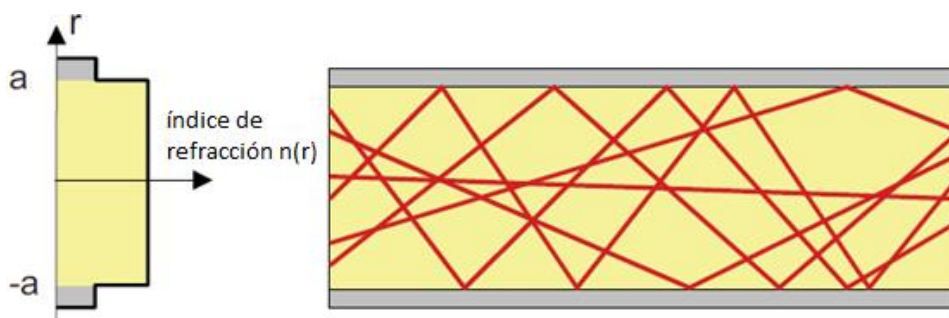


Figura 2. 3 Representación de la propagación de la luz en una fibra óptica de salto de índice [18].

El factor limitante de la SI-POF es la alta dispersión modal que introduce diferencia de retardos entre los modos que se propagan por la fibra, lo que se traduce en una reducción del ancho de banda de transmisión.

2.2.2 GI-POF

En este tipo de fibras el índice de refracción decrece de forma continua desde el centro del núcleo hasta el revestimiento donde toma su valor inferior. El índice de refracción del revestimiento es homogéneo y ligeramente inferior. En concreto, y al igual que en fibras GOF de índice gradual, las mejores características de transmisión se obtienen cuando el perfil de índice del núcleo adopta una forma parabólica. La Figura 2.4 representa de forma simplificada la forma en que la luz se propaga a través de la fibra [18].

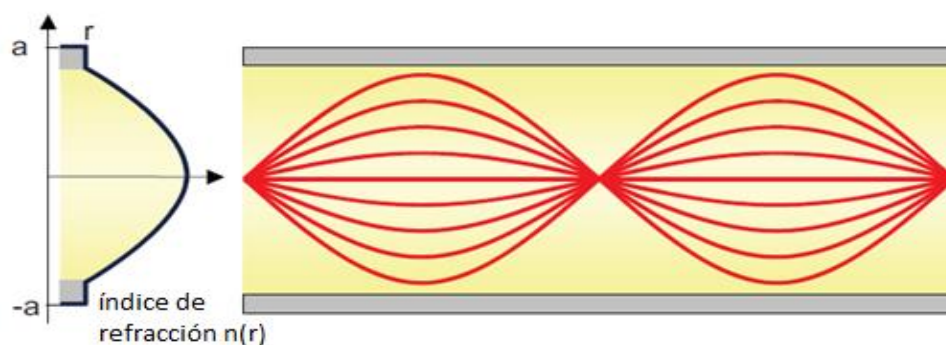


Figura 2. 4 Representación de la propagación de la luz en una fibra óptica de índice gradual [18].

Debido a que el índice de refracción varía continuamente, los haces de luz no se transmiten siguiendo una trayectoria recta sino que se curvan. Como el índice de refracción es menor en las regiones más lejanas al centro del núcleo implica que los modos más exteriores lleven una velocidad superior a los que se transmiten por el centro. Así mismo, los modos exteriores recorren una distancia superior lo que provoca que aparezca un efecto de ecualización de los retardos de los distintos modos. Por tanto, la dispersión modal de la GI-POF disminuye notablemente con respecto a la SI-POF resultando en un aumento del ancho de banda. Además, en las zonas más externas del núcleo el valor de NA disminuye dificultando la inyección. Esto implica que la luz se introduzca por el centro del núcleo. El factor limitante de este tipo de fibras es la atenuación, cuyo valor es mayor que en la SI-POF.

2.3 Ventajas de la POF y aplicaciones

Las características de la POF le confieren ciertas ventajas con respecto a la fibra óptica de vidrio en aquellas aplicaciones donde la distancia a cubrir sea corta. A continuación se enumeran las ventajas más destacables sobre la GOF y otros medios de transmisión guiados:

- Facilidad de manejo. El material del que se componen y su geometría proporcionan mucha flexibilidad y permiten el uso de equipos sencillos y baratos.
- Pocas pérdidas por curvaturas. Gracias a su gran apertura numérica admite modos de ángulos elevados que se generan tras una curvatura.
- Inmune frente a interferencias electromagnéticas. El material del que se compone aísla la fibra de la radiación externa.
- Elevados anchos de banda.
- Bajo coste.

Estas ventajas permiten a la POF ser el medio idóneo en las siguientes aplicaciones:

- Redes domésticas e industria. Permite cubrir la demanda de elevadas tasas de transmisión adaptándose a cualquier tipo de infraestructura.
- Automoción. En este ámbito la oferta de servicios y dispositivos digitales es creciente, por ello se utiliza la POF como solución a la necesidad de ancho de banda. Además sus características físicas permiten que se adapte al entorno de manera sencilla.
- Aeroespacial. Además de su buen ancho de banda y su inmunidad frente a EMI, es idónea gracias a su ligereza permitiendo sustituir los pesados cables de cobre.
- Medicina. Es utilizada en aplicaciones en las que son parámetros clave del diseño la flexibilidad y el bajo coste.

3. Metodología

En este capítulo se describen los sistemas de medida empleados para la caracterización experimental de GI-POF. Las tres medidas que se van a llevar a cabo son: atenuación espectral, respuesta frecuencial y campo lejano. Se describen los sistemas utilizados y el procedimiento de medida a seguir en cada una de ellas. Tanto el sistema para medir la atenuación espectral como el campo lejano han sido utilizados en numerosos estudios y proyectos anteriores por lo que sus configuraciones se encuentran optimizadas. En el caso del sistema de respuestas frecuenciales es necesario analizar todos sus elementos y adaptarlos para optimizar la obtención de medidas.

3.1 Medida de la atenuación espectral

La atenuación es el mecanismo responsable de la pérdida de potencia óptica de la señal al propagarse por la fibra óptica. Debido a la limitación de potencia que introduce es necesario caracterizarla para comprobar si el uso de una determinada fibra es viable. En la producción de fibra, así como en medidas de campo, el valor de la atenuación se suele determinar por vía reflectométrica. Sin embargo, el método más seguro y estable es el método de corte (*cut-back*) definido en el estándar JIS [19].

El método de corte está basado en la medida y comparación de la potencia óptica en dos puntos distintos de la fibra sin cambiar las condiciones de inyección. Así pues, la realización de este método consiste en medir la potencia óptica recibida a la salida de una longitud, normalmente grande, de la fibra óptica que se quiere caracterizar. Para medir la atenuación, este valor hay que compararlo con la potencia inyectada cuando no hay fibra o, lo que viene a ser lo mismo, usando una longitud muy corta de la misma que se obtiene cortando este pequeño tramo de la fibra inicial sin modificar sus condiciones de acoplo. De esta forma la referencia va a reflejar las pérdidas de acoplo que se van a descontar de las pérdidas totales para estimar las incurridas en la propagación por la fibra. Al medir la potencia para dos longitudes de fibra en las mismas condiciones y utilizar una de ellas como referencia, se evita el problema de la dependencia con λ de la potencia de la fuente de luz, de la responsividad del detector y de la eficiencia del monocromador. Las pérdidas por atenuación en el tramo largo de fibra en función de la longitud de onda, medidas en dBs, se obtienen como:

$$A(\lambda) = -10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_0(\lambda)} \quad (3.1)$$

siendo P_1 la potencia óptica recibida con un tramo largo de fibra y P_0 con un tramo corto de fibra. Para obtener la atenuación espectral por unidad de longitud basta tener en cuenta la longitud del tramo largo de fibra.

3.1.1 Descripción del sistema

En la Figura 3.1 se muestra un esquema del montaje de laboratorio utilizado para medir la atenuación espectral [20].

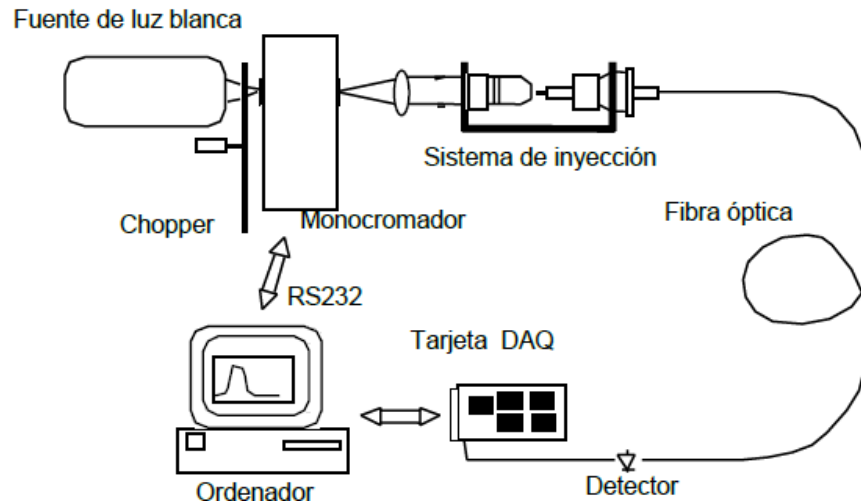


Figura 3. 1 Esquema del sistema utilizado para la medida de la atenuación espectral

En el emisor se utiliza una fuente de luz blanca cuya imagen se forma sobre la rendija de entrada del monocromador. Este monocromador actúa de filtro que selecciona la longitud de onda de trabajo. A la salida del monocromador se colima el haz de luz de forma que su posterior inyección en la fibra sea óptima. La luz, que previamente ha sido modulada por un *chopper* para eliminar todas las frecuencias que no sean la de trabajo, se inyecta en la fibra. Por otro lado a la salida de la fibra se dispone de un detector cuya salida se conecta a una tarjeta de adquisición que realiza una recepción síncrona de la señal. Para ello se conecta el controlador del *chopper* a la entrada de señal de modulación de la tarjeta para que sepa cuál es la señal de referencia a la que estamos modulando la luz. El valor de la medida de potencia óptica es volcado en el ordenador a través de la citada tarjeta de adquisición de datos.

3.1.2 Procedimiento de medida

Los pasos a seguir para medir la atenuación espectral son los siguientes:

1. Preparar los extremos de la fibra. Se cortan y se retira la cubierta.
2. Alinear la fibra tanto en emisión como en detección para maximizar la inyección de luz y optimizar su detección.
3. Realizar la medida con el programa creado para ello y guardarla.
4. Cortar un tramo de unos centímetros de fibra sin modificar el extremo de inyección, preparar el extremo cortado y optimizar de nuevo la detección.

5. Realizar la medida de la referencia con el programa y guardarla.
6. Realizar los cálculos de la ecuación 3.1 para obtener la atenuación espectral del tramo de POF.

3.2 Medida de las respuestas frecuenciales

La caracterización de la respuesta frecuencial es el apartado más importante de nuestro estudio y, por tanto, el que abarca la mayor parte de este trabajo. El sistema que se utiliza para la toma de medidas no se encuentra optimizado para GI-POF de modo que es necesario estudiar cada uno de sus elementos para elegir los más adecuados y realizar las medidas en las mejores condiciones posibles. En el proceso de toma de medidas se parte de un trabajo final de grado anterior donde se desarrolló un programa en Matlab que permite visualizar las respuestas frecuenciales en tiempo real y guardarlas para su posterior procesamiento [21].

3.2.1. Descripción del sistema

En la Figura 3.2 aparece el sistema completo utilizado para llevar a cabo las medidas de las respuestas frecuenciales.

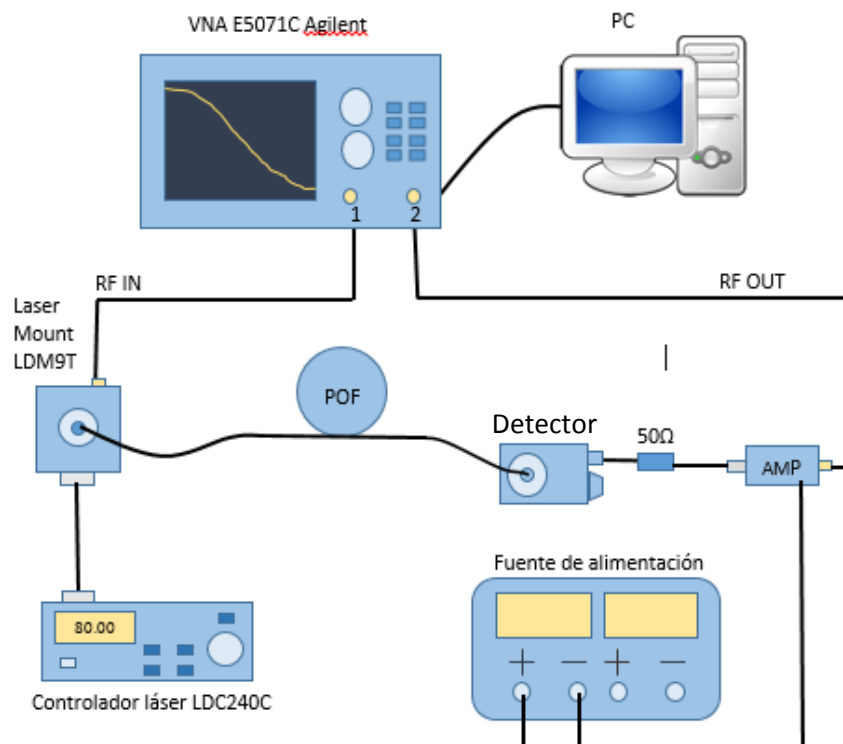


Figura 3. 2 Esquemático del sistema utilizado para medir la respuesta frecuencial de la fibra.

El analizador de redes vectorial (VNA, *Vector Network Analyzer*) es el elemento principal ya que permite obtener los parámetros S del sistema. Consta de dos puertos

conectados del siguiente modo: el puerto 1 se conecta a la entrada de modulación de la base controladora del láser y el puerto 2 a la salida del amplificador. De este modo en el puerto 2 se recupera la señal después de atravesar todo el sistema y se compara con la generada en el puerto 1 para dar lugar a nuestro parámetro de interés, el S_{21} .

La luz modulada a la salida del láser recorre el tramo de fibra y llega al detector que convierte la potencia óptica que recibe en una corriente de valor proporcional. Para transformar esa corriente en una tensión se conecta a la salida del detector una carga adaptada de 50Ω . Por último, se amplifica la señal utilizando el amplificador adecuado y se introduce de nuevo al VNA.

Se utiliza el programa de Matlab *pof.m* que facilita la adquisición de los datos del VNA y permite realizar operaciones sobre ellos en tiempo real [21], detallado en el Anexo V. En este estudio únicamente se utilizan sus funciones básicas de adquisición de datos para procesarlas posteriormente.

3.2.1.1 El analizador de redes vectorial

La característica principal del VNA es que permite medir los parámetros S o de *scattering* de una red de N puertos, siendo $N = 2$ en nuestro caso. En el Anexo II se detallan los conceptos teóricos acerca de estos parámetros.

Para estudiar el comportamiento de la respuesta frecuencial nos interesa centrarnos en el parámetro S_{21} ya que es el que mide la proporción de señal a la salida de la red, en el puerto 2, con respecto a la de entrada a la red, en el puerto 1 [22].

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.2)$$

El analizador empleado es el modelo E5071C de Agilent. Abarca un rango de frecuencias de 9 kHz hasta 4.5 GHz con un amplio rango dinámico de 130 dB y una velocidad de medida de 8 ms.

3.2.1.2 Componentes del extremo emisor

- Diodo Láser

Se utiliza un diodo láser (LD, *laser diode*) ya que presenta numerosas ventajas frente a otros tipos de emisores ópticos como el diodo LED. Las principales son su elevada potencia de salida y la pequeña anchura espectral que permite modularlo a frecuencias muy elevadas. La desventaja que presenta el uso del láser es el coste y la necesidad de ser polarizado con una corriente determinada.

En este estudio se requiere un láser con una potencia de emisión elevada para contrarrestar la atenuación de la GI-POF. Tras analizar varios tipos de LDs diferentes se decide utilizar el DL-5147-042 de la marca Sanyo que emite según el fabricante una potencia de 30 mW en 655 nm (color rojo), Anexo VI. La Figura 3.3 muestra la caracterización experimental de su curva de potencia frente a intensidad. Hay que tener en cuenta que la caracterización está limitada por el rango dinámico del medidor de potencia *Fotec*, cuya máxima potencia medible es 10 mW. A pesar de esto, la curva I-P obtenida demuestra que el dispositivo presenta una potencia ligeramente inferior a la publicada por el fabricante.

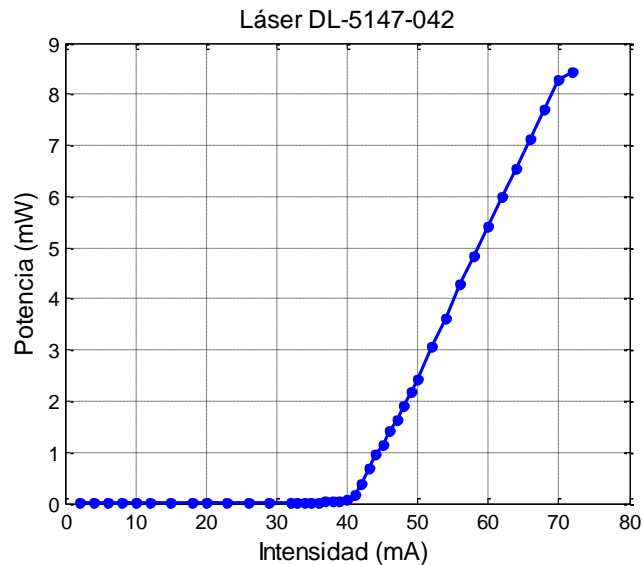


Figura 3. 3 Curva I-P del diodo láser DL-5147-042 medida experimentalmente.

- Base LD moduladora

La base moduladora va a permitir modular las señales y polarizar el láser de forma correcta además de controlar su temperatura para que no se produzcan variaciones en sus características de emisión. Su presencia afecta a la respuesta de nuestro sistema debido a las restricciones que introduce la electrónica que presenta.

Como base moduladora se ha utilizado LDM9T/M de Thorlabs que permite el control de temperatura del láser sin necesidad de un controlador externo. Teóricamente tiene una respuesta en frecuencia que llega hasta 1 GHz, como muestra la Figura 3.4, aunque tal y como se comprobará en el análisis posterior nos aporta medidas fiables para frecuencias mayores.

Para polarizar el láser se conecta a la base moduladora un controlador de intensidad, concretamente el LDC 200 de Thorlabs que permite limitar la intensidad máxima de salida para no sobrepasar la que es capaz de soportar el láser.

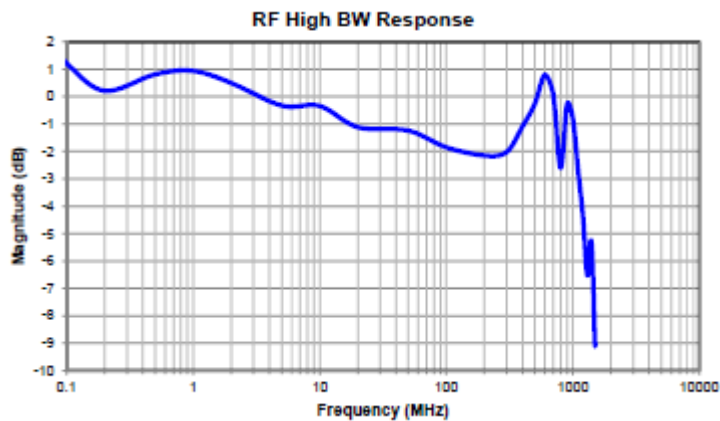


Figura 3. 4 Respuesta frecuencial de la base moduladora LDM9T/M proporcionada por el fabricante.

3.2.1.3 Componentes del extremo receptor

- Detector

En recepción se utiliza un fotodetector para captar la luz procedente de la fibra y convertirla en una señal eléctrica, Anexo II. Un parámetro importante a la hora de elegir un fotodetector es su área efectiva, en este caso como estamos trabajando con una fibra de plástico cuya luz se expande rápidamente al salir de la fibra, necesitamos un detector que tenga un área efectiva grande para poder captar todos los modos. Sin embargo, tener un área efectiva grande implica desventajas ya que además de introducirse más ruido, la respuesta del detector es más lenta lo que podría limitar el ancho de banda medible por nuestro sistema.

El detector elegido para realizar este trabajo ha sido el DET10A/M de Thorlabs. Está formado por un fotodiodo PIN de silicio que presenta un área intermedia de 1 mm de diámetro (0.8 mm²) y funciona para el rango de 200 a 1100 nm. En la curva de responsividad proporcionada por el fabricante (Anexo VI) se puede comprobar que para 655 nm estamos trabajando en un punto próximo al máximo.

- Amplificador

Como en la mayoría de sistemas de comunicaciones es necesario amplificar la señal en la detección debido al bajo nivel de potencia con el que se recibe debido a la atenuación que introduce el medio.

Los amplificadores tienen un compromiso entre su ganancia y su ancho de banda, es decir, aquellos que permitan medir en un rango mayor de frecuencias se van a ver limitados en ganancia y a la inversa. Otro parámetro importante a tener en cuenta en la elección es el nivel de figura de ruido que deberá ser el mínimo posible. En función de la longitud que estemos caracterizando será más conveniente utilizar un amplificador que otro con especial cuidado de no saturarlo.

En el laboratorio se dispone de dos amplificadores MiniCircuits cuyas principales características se muestran en la Tabla 3.1.

	ZKL-1R5+	ZKL-2R5+
Rango de frecuencias	10 – 1500 (MHz)	10 – 2500 (MHz)
Ganancia	40 dB	30 dB
Figura de ruido	3dB	5 dB

Tabla 3. 1 Comparación de los amplificadores ZKL-1R5+ y ZKL-2R5+.

- *ZKL-1R5+*

En la Figura 3.5 se muestra la curva de ganancia del amplificador medida con el VNA.

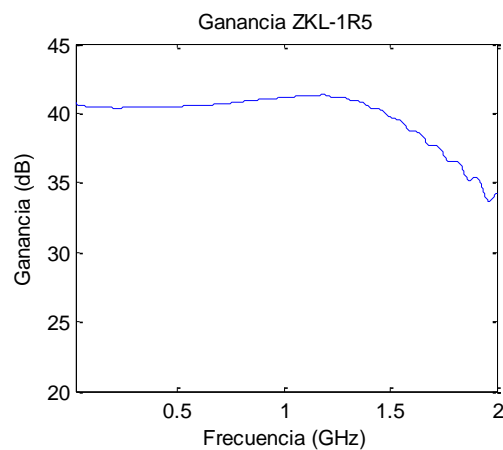


Figura 3. 5 Curva de ganancia del amplificador ZKL-1R5+.

Vemos que la ganancia se mantiene aproximadamente plana en el rango de frecuencias de trabajo. Al ser el que tiene mayor ganancia, aunque su ancho de banda se reduzca, es el más apropiado para usar cuando trabajamos con distancias largas de fibra donde la potencia de señal es baja y el ancho de banda se reduce.

- *ZKL-2R5+*

En la Figura 3.6 se muestra la curva de ganancia del amplificador medida con el VNA.

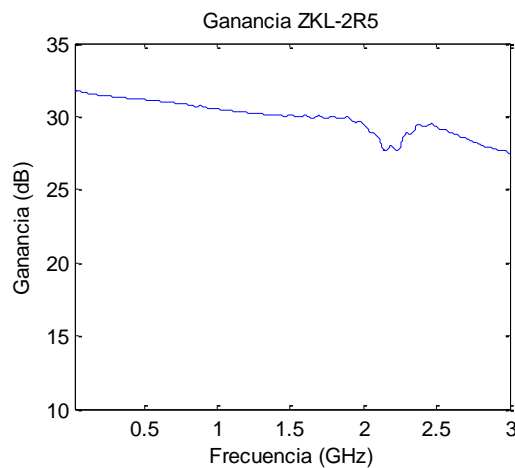


Figura 3. 6 Curva de ganancia del amplificador ZKL-2R5+.

Este amplificador presenta un mayor ancho de banda pero por contra su ganancia es menor que el anterior. Estas características hacen que sea un buen candidato para longitudes de fibra más cortas, donde el ancho de banda es grande y la potencia de señal recibida es alta.

3.2.2 Procedimiento de medida

Al igual que en el apartado 3.1 es necesario tomar la medida de la referencia para eliminar la influencia de todos los dispositivos presentes en el sistema, llamamos $H_{disp}(f)$ a esta respuesta frecuencial. Siendo $H(f)$ la respuesta frecuencial del sistema completo con el tramo de POF a analizar, podemos obtener la respuesta frecuencial de la POF aislada, $H_{POF}(f)$, de la siguiente manera:

$$H(f) = H_{emisor}(f)H_{POF}(f)H_{detector}(f)H_{ampli}(f) \quad (3.3)$$

$$H_{disp}(f) = H_{emisor}(f)H_{referencia}(f)H_{detector}(f)H_{ampli}(f) \quad (3.4)$$

$$\frac{H(f)}{H_{disp}(f)} = \frac{H_{POF}(f)}{H_{referencia}(f)} \Big|_{H_{ref}(f)=1} = H_{POF}(f) \quad (3.5)$$

Por tanto, para obtener la respuesta frecuencial de la fibra óptica hay que normalizar respecto de la referencia para eliminar todas las influencias externas a la POF, dividiendo si se trabaja en lineal como en la expresión anterior o restando si la escala es logarítmica.

Los pasos que hay que llevar a cabo para realizar las medidas son los siguientes:

1. Preparar los extremos de la fibra. Se cortan, se retira la cubierta, se pulen y conectorizan. En el anexo IV se detallan estos pasos.
2. Conectar el tramo de POF e introducir los parámetros óptimos de configuración del VNA. En el Anexo III se detalla cómo se han obtenido.
3. Obtener la respuesta frecuencial del tramo de POF con la ayuda del software y guardarla. Realizar este paso por los dos lados de la fibra.
4. Obtener la respuesta frecuencial de la referencia y guardarla.
5. Procesar los datos obtenidos. Se sustrae la referencia para obtener la respuesta frecuencial del tramo de POF. Si la medida lo permite, se obtiene el ancho de banda óptico a 3 dB, que se corresponde con el valor de frecuencia para el que la respuesta eléctrica normalizada por la referencia ha caído 6 dB.

3.2.3. Problemática y optimización de parámetros.

Las características de la GI-POF en combinación con la presencia de ruido e interferencias dificulta la medida de la respuesta frecuencial para frecuencias altas, más aún cuando la longitud de la fibra es grande (50 o 100 metros).

Desde que se empieza a medir con este sistema se visualizan interferencias cuya magnitud presentaba cierta variabilidad y cuya localización frecuencial se mantenía. Se observó que esta parte de señal no deseada queda enmascarada cuando la potencia en el receptor es alta y por tanto limita el rango máximo de frecuencia en las medidas con tramos largos de fibra. Para averiguar el origen de estas interferencias y tratar de solucionarlo aumentando la SNR al máximo se realizan varias pruebas, explicadas en detalle en el Anexo III.

Tras la realización de estas pruebas de control se extrajo la conclusión de que el propio emisor del sistema radia parte de la señal la cual se recibe en el detector que actúa como una antena. Además, no se descartó que la propia red eléctrica que alimenta todos los componentes del montaje también introdujera parte de señal no deseada. Para minimizar ambos efectos se separan el emisor del receptor de forma que la señal que se transmite por el aire llegue lo más atenuada posible reduciendo el nivel de interferencia. Además, el emisor y receptor se conectan a la red eléctrica en bancadas contiguas del laboratorio y se mide con una referencia de dos metros para disponer de margen de separación.

Además de la problemática de las interferencias, también es necesario analizar el valor que deben tomar los distintos parámetros del sistema para optimizar la toma de medidas. Los principales dispositivos que debemos configurar son el VNA y el controlador de intensidad del láser cuyo análisis aparece detallado en el Anexo III. En la Tabla 3.2 aparecen resumidos los valores que deben tomar los parámetros para que la toma de medidas se realice en las mejores condiciones posibles.

Parámetro	Valor
Intensidad de polarización del láser	80 mA
Potencia de RF (tramo de fibra largo)	10 dBm
Potencia de RF (referencia)	0 dBm
Número de puntos	1601
Ancho de banda filtro IF	5 KHz
Frecuencia start	10 MHz
Frecuencia stop	3 GHz
Voltaje alimentación amplificador	12 V

Tabla 3. 2 Resumen de los parámetros óptimos del sistema.

3.3 Medidas de campo lejano

Para completar la caracterización experimental de la GI-POF, se va a analizar la distribución espacial de potencia óptica a lo largo de la fibra. Para ello se ha realizado la medida de los patrones de campo lejano (FFP, *Far Field Pattern*) para diferentes longitudes.

El patrón de campo lejano define cómo es la distribución espacial de potencia óptica en función de los ángulos de salida a una distancia suficientemente alejada de la fibra. Su medida en distintas longitudes de fibra proporciona una idea de cómo se distribuyen los modos a lo largo de ésta. De la medida del FFP se obtienen los perfiles radiales, que representan la distribución de potencia óptica en función del ángulo de salida.

3.3.1 Descripción del sistema

El análisis de FFP en este trabajo consta de dos medidas distintas pero que se complementan. Por un lado se estudian los barridos angulares de FFP y por otro los perfiles radiales individuales. El sistema de captación y procesado del campo lejano que se utiliza en ambas es el mismo pero cambia el bloque de inyección. En la Figura 3.7 se muestra un esquema del sistema experimental.

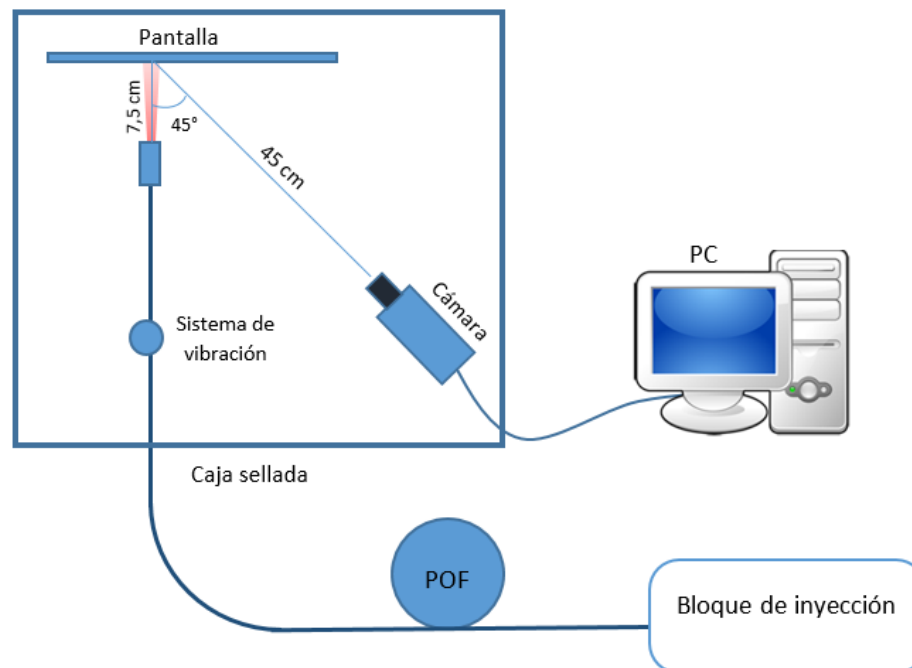


Figura 3. 7 Esquemático del sistema experimental utilizado para medir patrones de campo lejano.

Para una correcta toma de imágenes es necesario que el sistema de registro sólo mida la luz procedente de la fibra, toda luz ambiente introducida en la medida va a ser ruido añadido. Para ello, el bloque de registro está situado dentro de una caja sellada en la que la fibra se introduce por un pequeño orificio que no permite la entrada de luz.

Para una correcta toma de imágenes es necesario que el sistema de registro sólo mida la luz procedente de la fibra, toda luz ambiente introducida en la medida va a ser ruido añadido. Para ello, el bloque de registro está situado dentro de una caja sellada en la que la fibra se introduce por un pequeño orificio que no permite la entrada de luz. Además, dentro del bloque de registro, la fibra atraviesa un sistema de vibración basado en un motor móvil. Su función consiste en reducir el ruido *speckle* que genera el láser. Esta vibración equivale a realizar un promediado sobre las imágenes que el sistema registra durante el tiempo de exposición consiguiendo perfiles radiales con menos ruido. La luz a la salida de la fibra se refleja sobre una pantalla de tamaño DIN A4 alejada 7.5 cm del extremo de la fibra, distancia suficiente frente al diámetro de 1 mm de la fibra. Las imágenes sobre la pantalla son registradas por una cámara refrigerada monocromática de 12 bits conectada a un ordenador que permite su control mediante el software de captación de imágenes. Esta cámara se coloca con una inclinación de 45° respecto de la POF. El software procesa las imágenes para extraer los perfiles radiales realizando las correcciones correspondientes a la inclinación de la cámara y la distancia de la pantalla a la fibra.

- Barridos angulares

Cuando se realice esta medida el bloque de inyección que se utilizará será el siguiente:

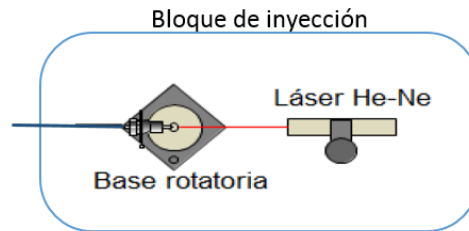


Figura 3. 8 Bloque de inyección para realizar barridos angulares.

En este bloque se utiliza un láser He-Ne que emite en 635 nm con una potencia de 5 mW. Este láser inyecta la luz de forma colimada en la fibra, que está situada sobre un posicionador que gira automáticamente acorde con los parámetros introducidos en el correspondiente programa de LabVIEW™.

El primer paso a seguir para realizar la medida consiste en centrar la fibra respecto al láser para obtener una inyección simétrica respecto al ángulo 0°, donde la potencia es máxima. Una vez centrada la inyección, se ajusta el centroide del patrón de campo lejano y el tiempo de exposición de la cámara. A continuación se realiza el barrido de -40° hasta 40° con un paso de 1°. El programa recoge el perfil radial para cada uno de los ángulos de entrada y los representa por columnas formando una matriz como la de la Figura 3.9. La imagen muestra los niveles de potencia con una paleta de colores que va desde el azul, correspondiente al nivel de potencia más bajo, hasta el rojo, que se corresponde al nivel de potencia más alto. La mitad superior de la imagen es una réplica de la inferior simetrizada para facilitar la visualización. Todas las medidas se encuentran normalizadas respecto del máximo.

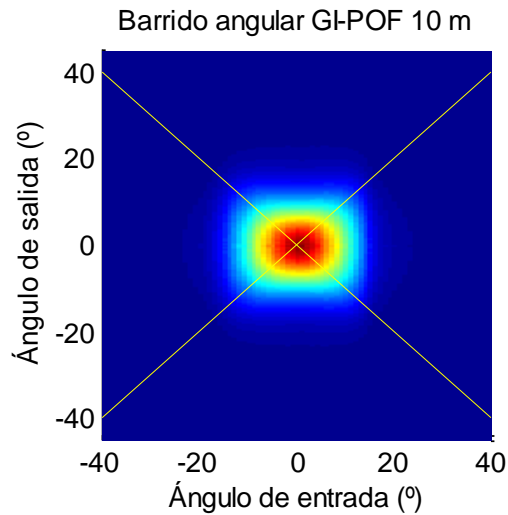


Figura 3. 9 Ejemplo de la matriz de un barrido angular.

- Perfiles radiales

Cuando se miden solamente los perfiles radiales el bloque de inyección que se utilizará será el siguiente:



Figura 3. 10 Bloque de inyección para medir perfiles radiales.

En este bloque se utiliza de nuevo el láser DL-5147-042 de Sanyo sobre la base que permite una fácil conexión sin necesidad de alinear la fibra, y el controlador de intensidad.

La toma de medidas es sencilla, una vez conectada la fibra se ajusta el centroide del patrón de campo lejano y el tiempo de exposición de la cámara. A continuación se toman 5 medidas seguidas del tramo en cuestión y se guardan. Posteriormente se promedian para reducir el ruido que presentan en los ángulos centrales.

4. Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de cada uno de los procedimientos de medida descritos en el capítulo 3 *Metodología*. Para caracterizar la fibra óptica de plástico de índice gradual se analizan tramos de fibra de diferente longitud y se realiza una comparación con la fibra de salto de índice, que por su sencillez de fabricación representa una tecnología más madura y es la más utilizada actualmente.

4.1 Atenuación espectral

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, los estudios previos realizados sobre la fibra de plástico de índice gradual muestran que la principal limitación que presenta en relación a las propiedades de transmisión es la atenuación. Para obtener la atenuación en todo el rango de longitudes de onda se aplica el método de corte explicado en el apartado 3.1 *Medida de la atenuación espectral*. Este proceso se realiza para aquellas longitudes con las que se va a trabajar posteriormente con el objetivo de analizar su comportamiento individual. Además, como el proceso de fabricación de la POF es muy poco homogéneo puede ocurrir que algunas longitudes presenten peores características que otras en cuanto a atenuación. Por ello, nos va a permitir seleccionar los mejores tramos de fibra para utilizarlos en las medidas posteriores, donde se va a requerir la máxima potencia posible.

En la Figura 4.1 se muestran los resultados obtenidos después de aplicar el método de corte para cada uno de los tramos estudiados. Conforme aumenta la longitud del tramo analizado, el rango de longitudes de onda en el que la medida es fiable disminuye, por ello se representa únicamente el rango en el que la medida es correcta. En cuanto a las longitudes utilizadas hay que destacar que el tramo 2 de 25 metros y el de 75 metros han sido obtenidos cortando el de 100 metros una vez que ya se han realizado todas las medidas posibles con él. Esto permite observar cómo dentro de un mismo carrete de fibra de este tipo el comportamiento es variante.

Como se aprecia en las medidas, conforme la longitud del tramo aumenta el rango de medida se va reduciendo en torno al valle de 650 nm, en el que la atenuación presenta el valor mínimo tal y como se indica en las hojas de características de la fibra, Anexo VI. Si nos centramos en el valor de este parámetro en la longitud de onda de trabajo de 650 nm, vemos que los valores obtenidos se corresponden aproximadamente con los 0.2 dB/m de atenuación medidos por el fabricante en esa longitud de onda. Además se aprecia cierta variabilidad tanto en longitudes de carretes diferentes como en las que pertenecen al mismo (25 m tramo 2, 75 m y 100 m).

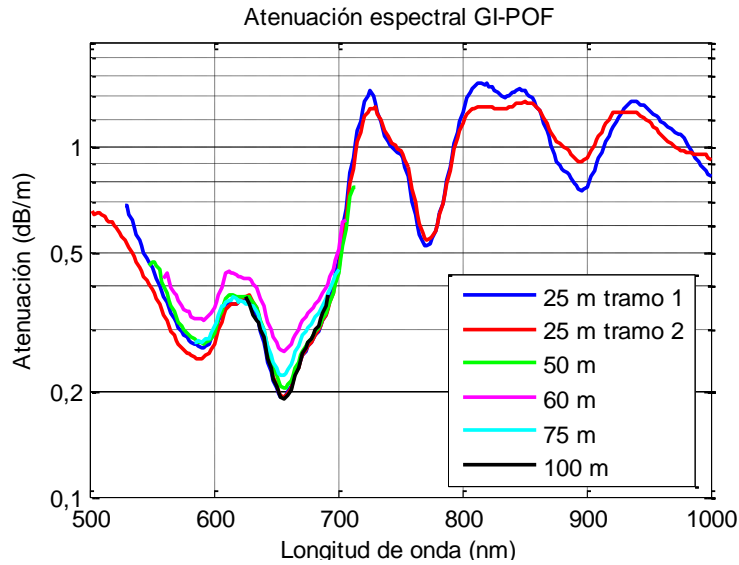


Figura 4. 1 Comparación de la atenuación espectral de varias longitudes de GI-POF OM-GIGA SE100.

A la vista de los resultados obtenidos, nos encontramos con que el tramo de fibra de 60 metros presenta una atenuación mucho mayor que el resto, 0.27 dB/m concretamente. Debido a que la atenuación es el principal factor limitante y contamos con un tramo de 50 metros cuya longitud es similar, se decide descartar este tramo de fibra para realizar las medidas posteriores.

4.1.1 Comparación con SI-POF

A continuación se aplica el mismo método sobre diferentes tramos de fibra óptica de plástico de salto de índice. De esta manera se verifican las propiedades comentadas en la teoría y se da una visión general de las diferencias que presentan ambas fibras. En la Figura 4.2 aparece la atenuación espectral de algunas de las longitudes disponibles en el laboratorio.

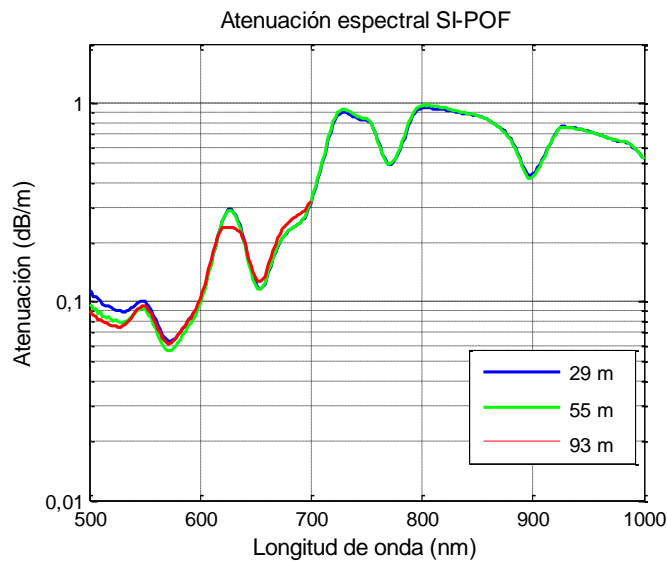


Figura 4. 2 Comparación de la atenuación espectral de tres longitudes de SI-POF modelo HFBR de Avago.

Efectivamente, en 650 nm la atenuación que presenta esta fibra es menor que en la GI-POF, en torno a 0,13 dB/m. A la vista de estos resultados se puede decir que en general la GI-POF tiene aproximadamente el doble de atenuación que la SI-POF en la longitud de onda que nos interesa. Además, la SI-POF presenta su mínimo absoluto en una longitud de onda menor que 650 nm, concretamente en torno a 570 nm (color verde). Es por ello que actualmente hay un especial interés en desarrollar componentes ópticos (fuentes principalmente) que emitan en color verde. Este hecho no es aplicable a la fibra de índice gradual, para la que nuestras medidas demuestran que el mínimo se sitúa en la longitud de onda correspondiente al color rojo.

4.2 Respuesta frecuencial

En el apartado *3.2 Medida de las respuestas frecuenciales* se detallaba el procedimiento de medida a seguir para obtener las respuestas frecuenciales. A continuación se analizan los resultados obtenidos para las longitudes estudiadas de 25, 50 y 75 metros utilizando el sistema definido en la Figura 3.2. Debido a la atenuación que introduce el tramo de 100 metros no ha sido posible obtener la respuesta frecuencial de este tramo de fibra y por tanto no se incluye en este estudio.

Para optimizar los resultados en cada una de las longitudes analizadas se utiliza el amplificador que mejor se adapta en función de los niveles de potencia recibidos. En caso de que sea un tramo corto de fibra (25 metros) conviene utilizar un amplificador que tenga un gran rango de amplificación a costa de una ganancia menor (ZKL-2R5+). Para aquellos tramos de fibra más largos se necesita un amplificador que aporte la mayor ganancia posible (ZKL-1R5+).

Todas las curvas que se muestran a continuación son normalizadas a cero para poder visualizar con mayor claridad las diferencias en las caídas de la respuesta frecuencial y así realizar comparaciones entre varias condiciones. En cada una de ellas se ha medido la referencia tal y como se ha explicado en el apartado *3.2.2 Procedimiento de medida*.

La Figura 4.3 muestra una comparativa entre las respuestas frecuenciales normalizadas de las longitudes analizadas. Mediante la representación de estas curvas se pretende dar una idea general del rango de frecuencias que es posible medir conforme se aumenta la longitud de la fibra. Para cada uno de los tramos se la representación se realiza aproximadamente hasta la frecuencia a partir de la cual las interferencias presentan una magnitud tal que no es posible visualizar la señal.

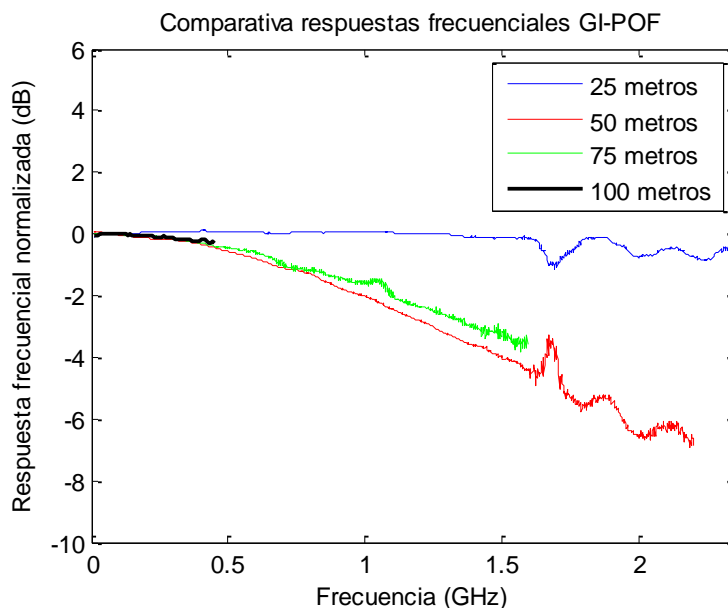


Figura 4. 3 Comparación de las respuestas frecuenciales normalizadas de varias longitudes de GI-POF.

En el caso de la longitud más corta considerada (25 m), el detector percibe una gran cantidad de potencia permitiendo enmascarar la mayoría de las interferencias en frecuencias altas exceptuando la que aparece en torno a 1,6 GHz y que es debida al cero que introduce la base moduladora en esa frecuencia (ver Figura 3.4). Cuando analizamos los tramos de 50, 75 y 100 m el sistema se encuentra limitado por la atenuación de la fibra, lo que provoca que a partir de cierta frecuencia sólo se detecte ruido e interferencias (siendo mucho más evidente en el tramo de 100 metros).

Hay que tener en cuenta que el proceso de fabricación de la GI-POF es muy heterogéneo debido a la dificultad de formar el perfil de índice gradual, lo cual explica que exista tanta diferencia entre el comportamiento de todos los tramos. Concretamente entre los tramos de 50 y 75 metros, donde lo lógico sería que el de 50 metros tuviera más ancho de banda y no es así. Además no sólo existen diferencias de comportamiento entre fibras de distinto carrete, sino que varios tramos de un mismo carrete pueden comportarse de manera muy variable.

4.2.1 Comparación con SI-POF

A continuación se realiza una comparación de las respuestas frecuenciales de GI-POF obtenidas anteriormente con otras de SI-POF que hemos realizado en tramos de similares. Para tomar estas medidas se ha utilizado el amplificador ZKL-1R5+ ya que como la SI-POF no tiene tanto ancho de banda, es mejor utilizar el de mayor ganancia. En la Figura 4.4 se muestran las respuestas frecuenciales de las tres longitudes correspondientes a las medidas con GI-POF y sus respectivas con SI-POF.

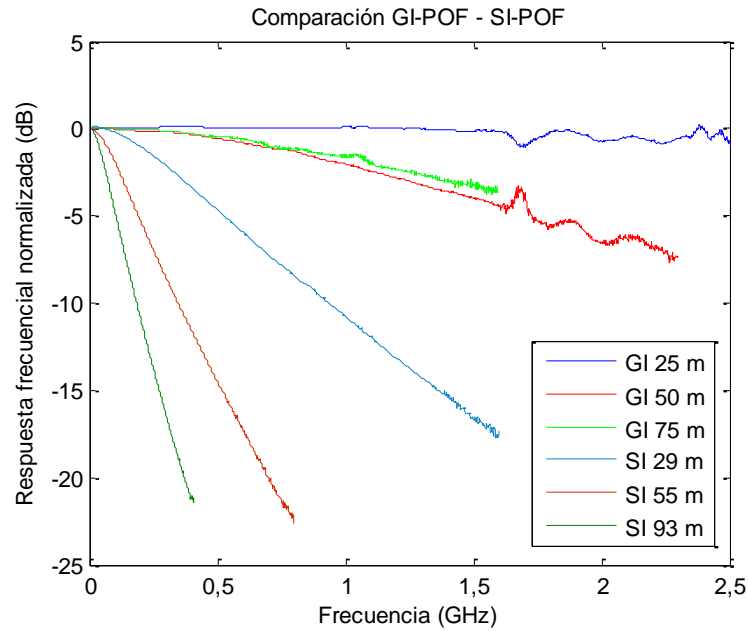


Figura 4. 4 Comparación de las respuestas frecuenciales de GI-POF (OM-Giga) y SI-POF (HP).

Tal y como se ha visto en la teoría, comprobamos que el ancho de banda a 6 dB es mucho mayor en la fibra de índice gradual. Si nos centramos en la longitud de 50 metros (por ser la única que cae a -6 dB), se obtiene un ancho de banda aproximado de 1.95 GHz, mientras que en 55 metros de SI-POF esta caída se produce en 221 MHz. Además como se ha visto en el apartado anterior, la SI-POF tiene la mitad de atenuación y, por tanto, en la detección llega mucha más potencia obteniendo unas medidas menos ruidosas.

4.2.2 Estudio de las condiciones de inyección

Las respuestas frecuenciales obtenidas para las diferentes longitudes tienen una gran dependencia con las condiciones de inyección. Para analizar esta situación se va a someter a la GI-POF a diferentes condiciones de inyección para comprobar su comportamiento y compararlo con la inyección directa realizada inicialmente. Además se realizan varias medias por los dos extremos de la fibra para conocer el grado de repetibilidad de las medidas.

Para llevar a cabo el análisis de las condiciones de inyección se modifican tanto el extremo de la fibra por el que se introduce la luz como la propia luz incidente. Por un lado se han realizado medidas mediante la inyección directa del láser (UFL, *Underfilled Launching*), el cual emite un patrón de luz altamente elíptico de manera que la luz no se introduce en la fibra uniformemente por toda su superficie. Por otro lado, con el fin de que la luz sea uniforme en toda la superficie, se inyecta ésta a través de un rabillo de fibra de salto de índice conectado al láser (OFL, *Overfilled Launching*). Estas dos situaciones se analizan para dos terminaciones del extremo de entrada de la GI-POF: con la superficie rugosa producida por la cortadora y con la superficie perfectamente pulida.

Por último, en el tramo más corto de 25 metros se caracteriza la influencia de un *scrambler*. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las longitudes de fibra de nuestro estudio.

- 25 metros

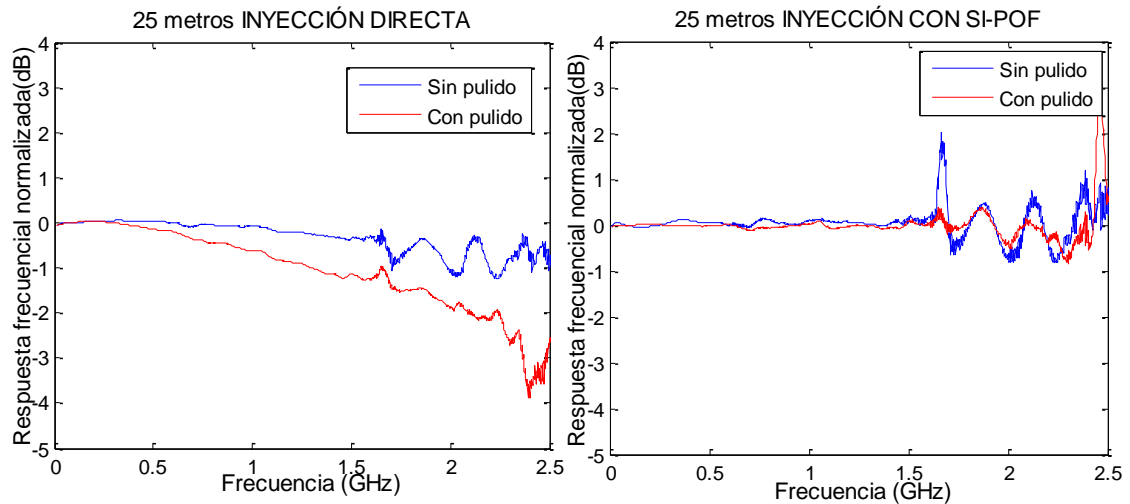


Figura 4. 5 Comparación de la respuesta frecuencial con 25 metros. Izquierda: Inyección directa con láser altamente elíptico, UFL. Derecha: Inyección uniforme con un tramo corto de SI-POF, OFL.

En la Figura 4.5 se muestran las respuestas frecuenciales resultantes de inyectar directamente con el láser (izquierda) y mediante el rabillo de SI-POF (derecha), ambas con y sin pulido. A rasgos generales se observa que independientemente del tipo de inyección, la frecuencia hasta la que las medidas son fiables por estar libres de ruido e interferencias es 1.5 GHz, ya que el propio sistema introduce limitaciones. Con respecto al valor del ancho de banda, no es posible medirlo ya que la respuesta frecuencial no llega a caer 6 dB en ningún caso.

Si nos centramos en la Figura 4.5 izquierda, referida a la inyección directa con el láser, se observa que la respuesta frecuencial normalizada con la superficie rugosa es aproximadamente plana hasta 1.5 GHz. Sin embargo, cuando se aplica el pulido a la fibra se ve como la pendiente negativa de la curva aumenta, lo que implica una reducción del ancho de banda.

Cuando en la inyección se utiliza un rabillo de SI-POF entre el láser y el tramo de GI-POF, Figura 4.5 derecha, no se aprecian diferencias en cuanto a la pendiente de las curvas con y sin pulido. Simplemente se observa que cuando pulimos la superficie, el nivel de interferencias es inferior debido al mejor acoplo de luz. Ambas medidas, con y sin pulido, representan una respuesta frecuencial más plana que en la inyección directa siendo muy visible el aumento de ancho de banda si la superficie está pulida y sólo ligero cuando no lo está.

- 50 metros

Al igual que en 25 metros, realizamos la misma representación para 50 metros.

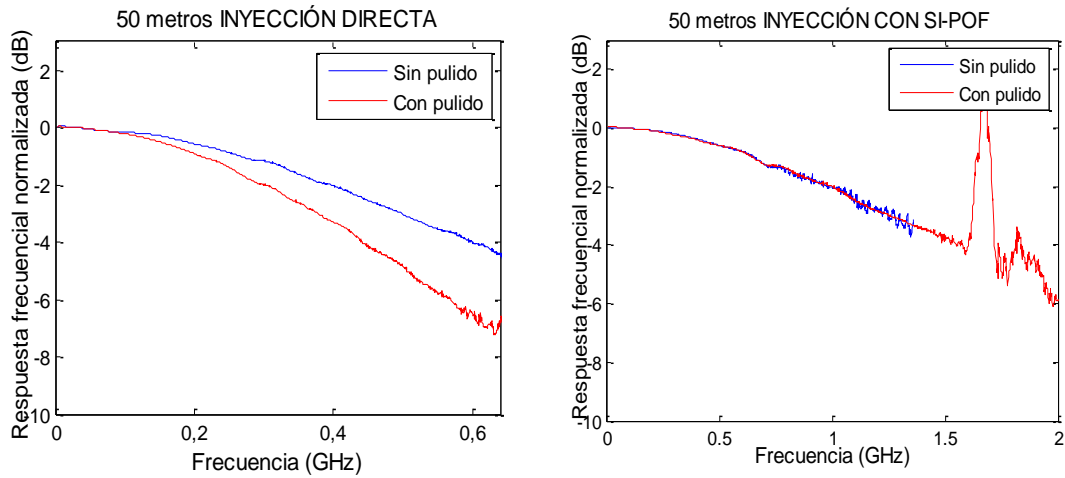


Figura 4. 6 Comparación de la respuesta frecuencial con 50 metros. Izquierda: Inyección directa con láser altamente elíptico, UFL. Derecha: Inyección uniforme con un tramo corto de SI-POF, OFL.

El comportamiento general medido para el tramo de 50 m presenta las mismas características que el del tramo de 25 metros con la diferencia de que las pendientes de todas las curvas son mucho mayores, resultando en menores anchos de banda como cabe esperar. Para este tramo de fibra es posible dar un valor de ancho de banda en una de las situaciones analizadas. Concretamente, cuando se inyecta directamente con el láser y la superficie de la fibra está pulida el ancho de banda es de 1.4 GHz. Se observa que en las tres situaciones restantes el ancho de banda es superior a 1.6 GHz pero no es posible dar un valor exacto debido a las interferencias.

- 75 metros

En la Figura 4.7 se muestra la comparativa de los diferentes tipos de inyección para el tramo de 75 metros.

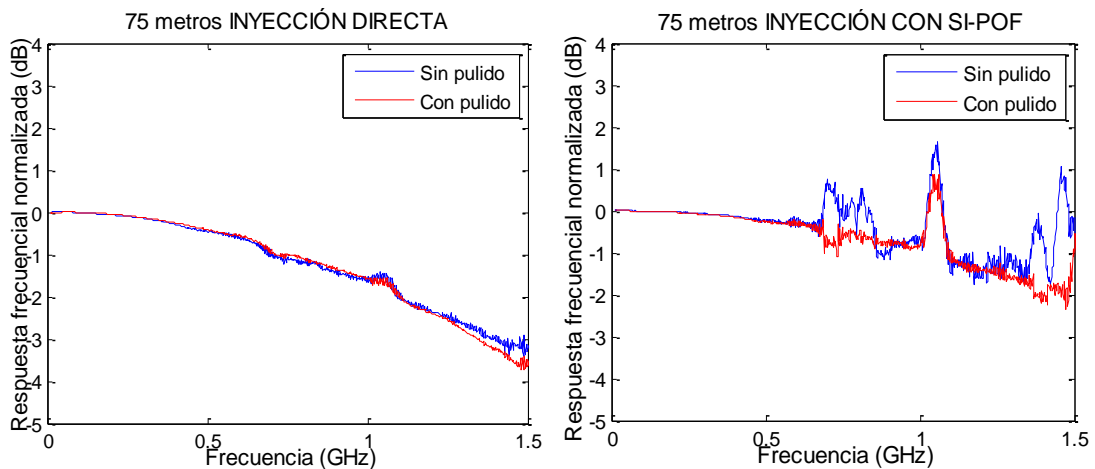


Figura 4. 7 Comparación de la respuesta frecuencial con 75 metros. Izquierda: Inyección directa con láser altamente elíptico, UFL. Derecha: Inyección uniforme con un tramo corto de SI-POF, OFL.

A diferencia de las dos longitudes anteriores, cuando se realiza la inyección directa con el láser las dos curvas son muy parecidas. El efecto de disminución de ancho de banda cuando se pulen los extremos es mucho más ligero, lo que indica que al aumentar la longitud de la fibra la dependencia de sus prestaciones con las condiciones de inyección se reduce.

- Scrambler

El *scrambler* es un dispositivo corrugado con siete periodos de 6 mm y una profundidad de 0.5 mm, como se ve en la Figura 4.8. Provoca que los modos más externos se radien y redistribuye los modos internos de la fibra induciendo al acoplo modal. Se ha comprobado que colocado cerca del extremo emisor consigue que la medida no dependa del tipo de fuente óptica utilizada, es decir, uniformiza las condiciones de inyección [24].



Figura 4. 8 *Scrambler*.

Para observar qué efecto provoca el *scrambler* en la GI-POF se aplica sobre la longitud más corta de 25 metros, ya que debido a las pérdidas de inserción del dispositivo es la única medible. Además, es esperable que su efecto sea más notable en esta longitud, mientras que en longitudes más largas es más probable que la luz alcance el equilibrio modal y su efecto será difícilmente observable [23].

En la Figura 4.9 aparece una comparación de las respuestas frecuenciales cuando no se utiliza *scrambler*, con *scrambler* en el extremo de emisión y en el de detección.

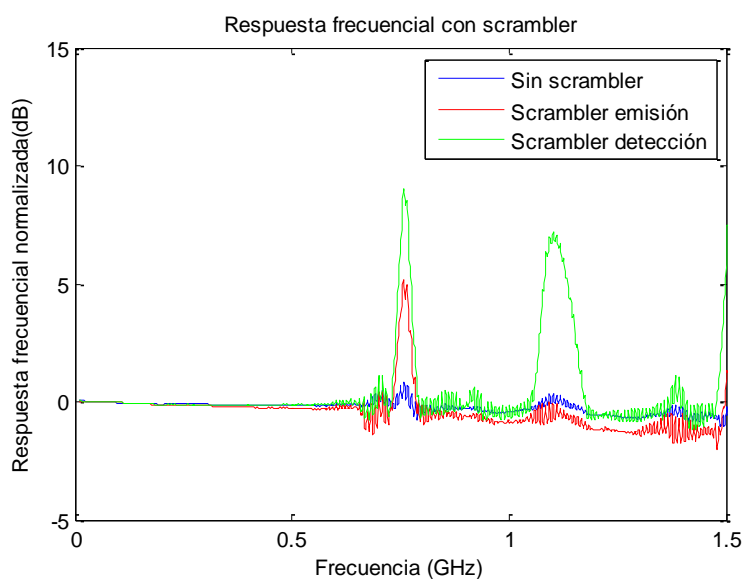


Figura 4. 9 Comparación de respuestas frecuenciales con scrambler en emisión, detección y sin él.

En el caso del *scrambler* en emisión, la potencia inyectada en los modos centrales se difunde a modos más externos. En una fibra con perfil de salto de índice esto provoca que el retardo entre los modos aumente y, como consecuencia, el ancho de banda disminuya notablemente [23]. Como la fibra es de perfil de índice gradual, no existe casi retardo entre los modos externos y los internos y por eso la diferencia que se aprecia respecto de la inyección sin *scrambler* no es significativa. Cuando el *scrambler* se aplica en detección actúa como un filtro modal radiando la potencia de los modos más exteriores y aumentando el ancho de banda en SI-POF [24]. Como se observa, en el caso de GI-POF, la respuesta frecuencial es similar al caso sin *scrambler*.

4.2.3 Estudio de la variabilidad

Para completar el estudio de las respuestas frecuenciales, se analiza la variabilidad de las medidas en función de las condiciones de inyección. El procedimiento seguido consiste en realizar el promedio de los dos extremos de cada tramo de fibra y posteriormente, en puntos concretos, hacer el cálculo de la desviación estándar para representar las barras de error.

En la Figura 4.10 aparecen las cuatro condiciones de inyección vistas anteriormente para las tres longitudes de fibra.

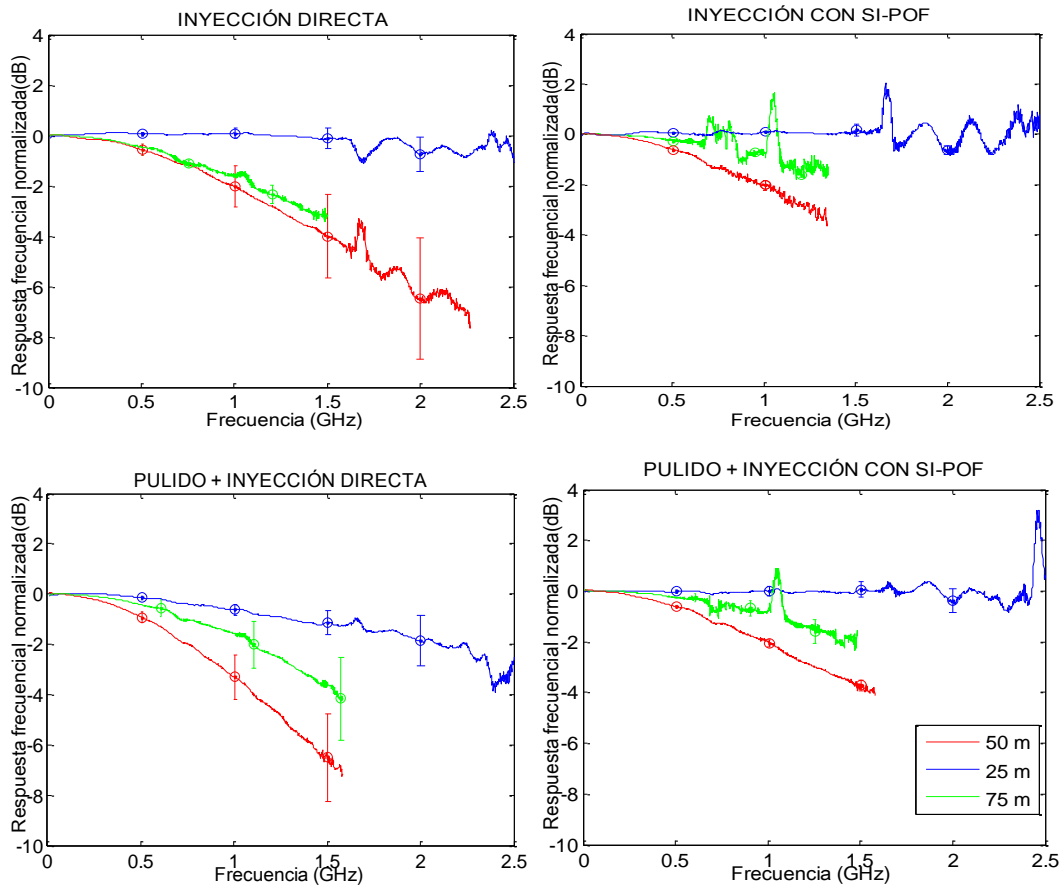


Figura 4. 10 Variabilidad según las condiciones de inyección de arriba a abajo y de izquierda a derecha: Inyección directa, Inyección con SI-POF, Pulido e inyección directa, Pulido e inyección con SI-POF

El principal efecto visible en esta comparativa se encuentra en la inyección con el rabillo de SI-POF frente a la inyección directa. En todos los casos cuando se inyecta con el rabillo se reduce la variabilidad. Esto es debido a que con inyección directa del láser la luz no sigue un patrón uniforme (sino altamente elíptico) y en cada una de las medidas se modifica la posición de la fibra respecto del láser provocando condiciones diferentes. Cuando se inyecta con el rabillo no existe apenas variabilidad ya que gracias a éste la luz que entra en la fibra es uniforme en toda la superficie siendo prácticamente igual en todas las medidas.

En la Tabla 4.1 aparecen resumidos los efectos de las condiciones de inyección. Cabe destacar que conforme la longitud de la fibra aumenta la influencia de estos efectos se atenúa.

TIPO DE INYECCIÓN	EFEECTO
Directa (UFL)	Las medidas de los dos extremos presentan variabilidad
Pulido	Reduce el ancho de banda en la inyección directa Aumenta la potencia transmitida No afecta a la variabilidad
Rabillo (OFL)	Uniformiza las medidas respecto de la inyección directa, la respuesta frecuencial no depende del estado de la superficie (rugosa o pulida) Introduce atenuación Aumenta el ancho de banda Reduce la variabilidad de las medidas por los dos extremos
Scrambler	Introduce una gran atenuación En emisión: Reduce ligeramente el ancho de banda En detección: No afecta a la medida

Tabla 4. 1 Resumen de los efectos provocados en cada una de las condiciones de inyección.

4.3 Medidas de campo lejano

En este apartado se estudian los patrones de campo lejano con el objetivo de analizar espacialmente el comportamiento que presenta la luz al propagarse por la fibra de índice gradual. Este estudio se realizará al igual que los anteriores en función de la longitud de la fibra. En concreto, para hacer un análisis completo inicialmente se han realizado barridos angulares, en los que se modifica el ángulo de inyección y que permitirán modelar matemáticamente la propagación de la luz a través de la GI-POF. Posteriormente se han obtenido los perfiles radiales en un escenario más realista, usando componentes comerciales con los que se despliegan enlaces POF, como el caso del diodo láser que se usó en la medida de respuestas frecuenciales.

4.3.1 Barridos angulares

En éste primer análisis general de la GI-POF se utiliza el láser de He-Ne descrito en el apartado 3.3 *Medida de campo lejano*. Conviene pulir la fibra para optimizar el acoplo de luz, ya que el láser emite con una potencia relativamente baja (5 mW).

A continuación en la Figura 4.11 se muestran las matrices de los barridos angulares para diferentes longitudes de GI-POF que pertenecen al mismo carrete de fibra de 25 metros. Cabe destacar que se ha realizado el método *cut-back*, explicado en el apartado 3.1 *Medida de la atenuación espectral*, de forma que el extremo de inyección no se modifica para realizar todas las medidas bajo las mismas condiciones.

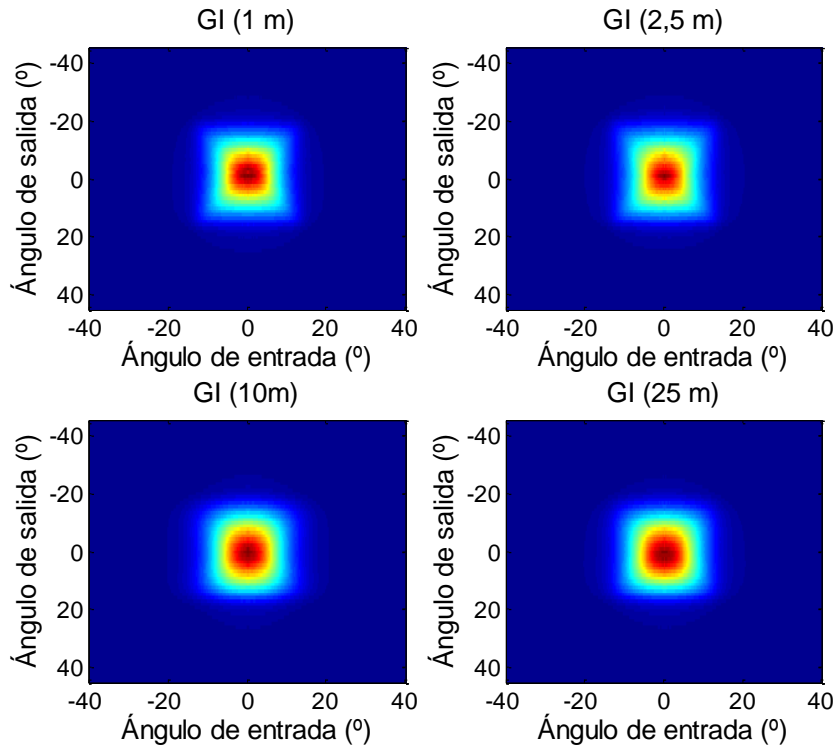


Figura 4. 11 Comparación de barridos angulares de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 1, 2.5, 10 y 25 metros de GI-POF.

En esta representación se observa que la distribución de potencia es muy similar en todas las longitudes. Se comprueba que en este tipo de fibras la mayoría de los modos se transmiten por los ángulos centrales. Al ser fibra de índice gradual el ángulo de aceptación disminuye cuando nos alejamos del núcleo tal y como se ve en la Figura 4.12. Es por esta razón que cuando se aumenta el ángulo de inyección los modos se introducen únicamente por el centro de la fibra.

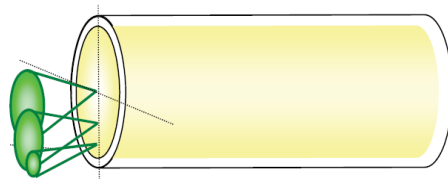


Figura 4. 12 Comportamiento del ángulo de aceptación en función del índice de refracción [18].

Una pequeña diferencia apreciable entre las longitudes representadas se observa en las esquinas de las distribuciones de potencia, ya que en las longitudes más cortas (1 y 2.5 metros) las esquinas son más pronunciadas que en las longitudes más largas (10 y 25 metros) donde son ligeramente más redondeadas. Esto se produce por la combinación de dos efectos: por una parte la atenuación modal hace que los modos externos pierdan potencia en mayor medida que los de menor orden, que se guían siguiendo trayectorias más cortas. Por otra parte, la fibra de plástico presenta acoplo modal que produce mezcla de modos y principalmente transferencia de los de mayor a los de menor orden.

En la Figura 4.13 se representan las medidas resultantes de los barridos angulares para las longitudes consideradas de una manera diferente: superponiendo los perfiles radiales obtenidos para cada ángulo de inyección. La representación abarca los ángulos de entrada desde -15° hasta 15° ya que las medidas demuestran que la inyección de luz fuera de este rango no es eficiente y la potencia a la salida de la fibra no es suficiente. En estas gráficas se observa como para los tramos de fibra cortos los perfiles radiales experimentan un ensanchamiento al aumentar el ángulo de entrada, mientras que el conjunto de perfiles radiales para longitudes de 10 y 25 m son muy similares, lo que induce a pensar que en estas longitudes el campo lejano ha alcanzado estado estacionario.

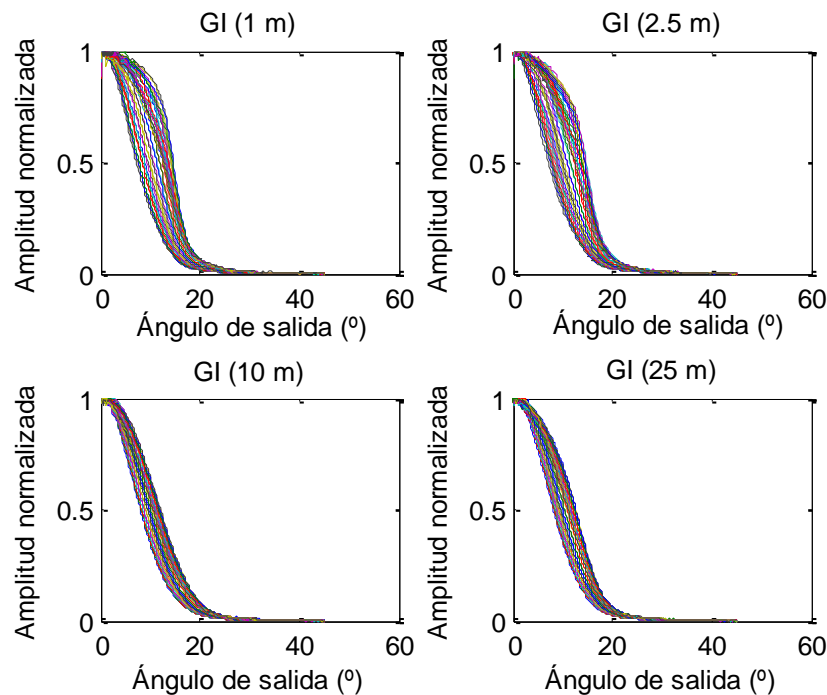


Figura 4. 13 Comparación de superposición de barridos angulares de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 1, 2.5, 10 y 25 metros de GI-POF.

Es posible tomar como parámetro de estudio la anchura del perfil radial ya que para cualquier ángulo de inyección se han obtenido distribuciones de potencia óptica con un único máximo centrado en el origen. Así, en la Figura 4.14 se incluye una forma más compacta de representar las medidas anteriores, donde se representa la anchura a media altura de cada uno de los perfiles radiales obtenidos en el barrido angular en función del ángulo de entrada.

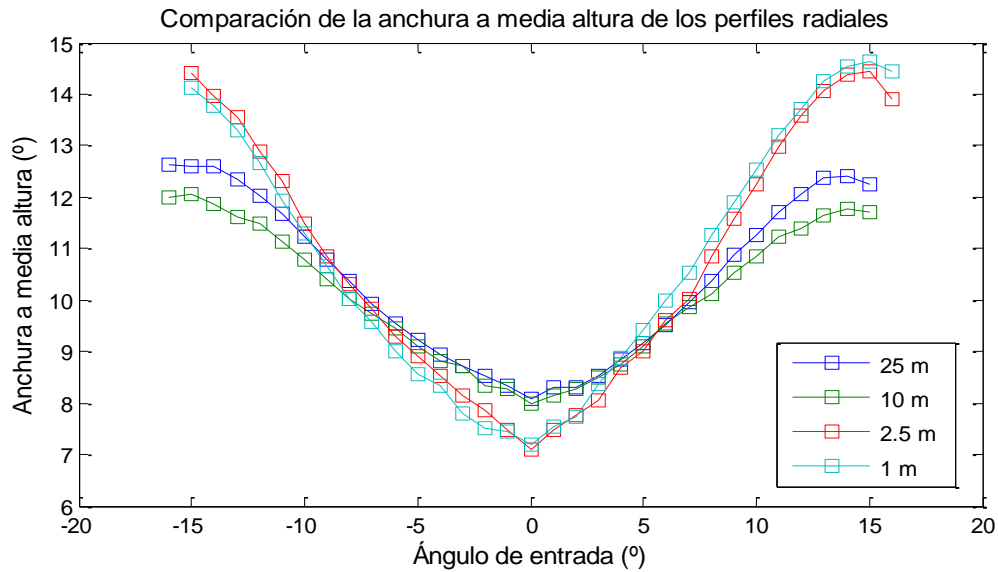


Figura 4. 14 Comparación de la anchura a media altura de los barridos de 25, 10, 2.5 y 1 metro de GI-POF.

En general, se observa que cuando la luz se inyecta por los ángulos más próximos al eje de propagación el perfil radial es más estrecho mientras que al inyectar luz en ángulos cada vez más grandes esta anchura aumenta.

Las longitudes más cortas (1 y 2.5 metros) presentan mayor variación entre la anchura del perfil radial cuando se inyecta en ángulos grandes, donde se obtienen perfiles radiales anchos, respecto a la inyección en ángulos pequeños, donde se obtienen perfiles radiales más estrechos. En los tramos de fibra mayores (10 y 25 metros), la anchura a media altura es menos variable al modificar el ángulo de inyección.

4.3.1.1 Comparación con SI-POF

Al igual que se ha hecho en el apartado 4.2 *Respuestas frecuenciales* hacemos una comparación con la fibra de plástico SI-POF para conocer las principales diferencias en la distribución espacial de potencia entre estos dos tipos de fibra. En la Figura 4.15 se representan los barridos angulares para distintas longitudes de un mismo carrete de SI-POF.

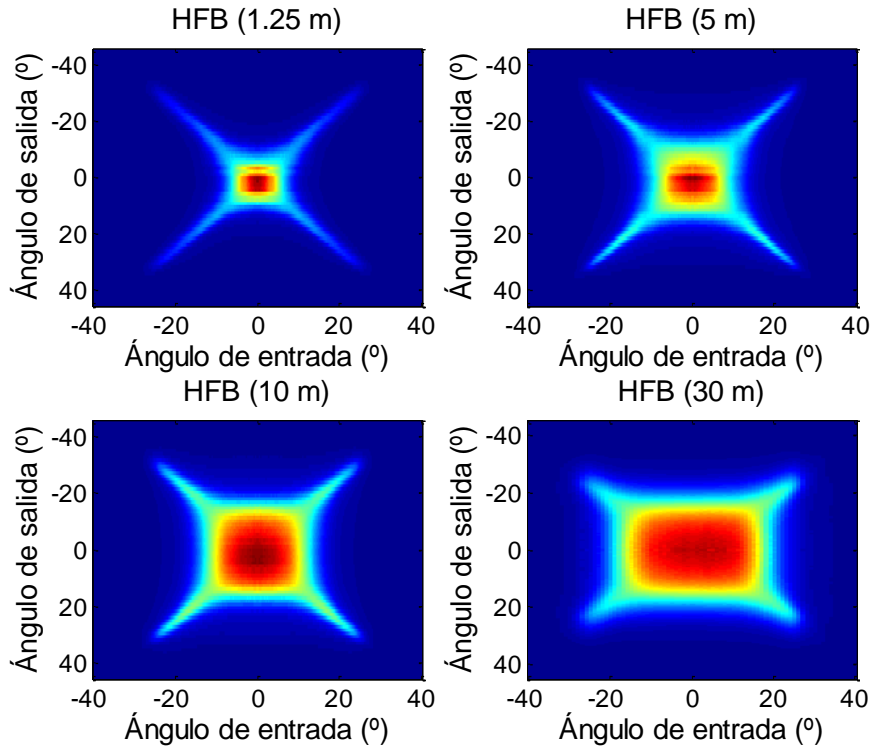


Figura 4. 15 Comparación de barridos angulares de SI-POF de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 1.25, 5, 10 y 30 metros.

A la vista de los resultados, la diferencia más destacable es que las distribuciones de potencia de SI-POF presentan “patas”. La interpretación a esta observación es que para ángulos de inyección altos, la distribución espacial a la salida contiene potencia óptica principalmente en esos ángulos. Como ya se ha visto en el capítulo 2. *Fundamentos teóricos*, este tipo de fibra se caracteriza por tener el perfil de índice de refracción constante en toda su superficie, lo que implica que el ángulo de aceptación también lo sea. Esto facilita la inyección de ángulos mayores ya que se pueden inyectar en toda la superficie a diferencia de la GI-POF que presenta el efecto de filtrado de ángulos altos en inyección como ya se ha comentado.

Al igual que ocurre en la GI-POF, aunque en ella no se aprecia de manera tan clara, conforme la longitud aumenta las “patas” disminuyen debido a la atenuación modal diferencial y la mezcla de modos. Al mismo tiempo la distribución de potencia contiene ángulos de salida mayores conforme la longitud aumenta que contribuyen a aumentar la dispersión modal, disminuyendo el ancho de banda.

Tras ver el comportamiento espacial de la potencia en los dos tipos de fibras, se observa que la GI-POF es mucho más uniforme y las variaciones cuando cambia la longitud son mínimas. Debido a su perfil de índice de refracción favorece la inyección y posterior propagación en ángulos bajos, lo que unido al efecto ecualizador de retardos reduce fuertemente la dispersión modal permitiendo ofrecer anchos de banda más grandes.

4.3.1.2 Influencia de la superficie de la fibra

A continuación se realiza un pequeño análisis de las distribuciones espaciales de potencia en función del estado de la superficie de la fibra. En la Figura 4.16 se observan los barridos angulares para dos de las longitudes más ilustrativas, 25 y 75 metros, con la superficie pulida y tras realizar un corte.

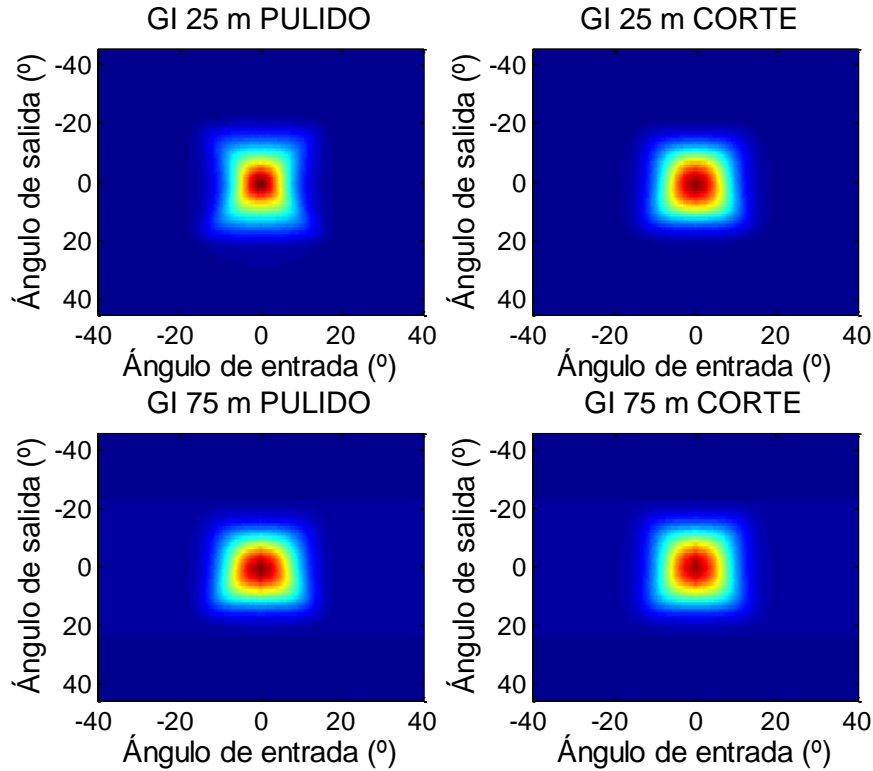


Figura 4. 16 Comparación de barridos angulares de GI-POF de arriba a abajo y de izquierda a derecha: 25 m pulido, 25 m corte, 75 m pulido y 75 m corte.

En la longitud corta de 25 metros se observa como con en el pulido se marcan las esquinas correspondientes a los modos de ángulos superiores, mientras que cuando se realiza un corte estas esquinas desaparecen. Esto indica que la difusión que experimenta la luz en la superficie de entrada de la fibra es menor en caso de que esta superficie esté pulida. En relación con los resultados presentados en la apartado 4.2. *Respuesta frecuencial*, se puede concluir que el hecho de que los modos exteriores se transmitan sólo con la superficie pulida provoca que la dispersión modal aumente ligeramente bajo esta condición, lo cual explica que cuando se pule la fibra, ésta presente menos ancho de banda. Por el contrario cuando se realiza un corte la dispersión modal es menor ya que no se transmiten esos modos dando lugar a mayor ancho de banda.

Por otro lado, si observamos las características espaciales a la salida de la fibra para ángulos de inyección bajos (como es el caso cuando inyectamos con el láser de forma directa, ver siguiente apartado), podemos concluir que los perfiles radiales son más estrechos en caso de que el extremo de la fibra esté pulido. De nuevo, este comportamiento indicaría una menor difusión de la luz en el punto de inyección originada por el pulido de la fibra.

En el caso de 75 metros el comportamiento espacial es prácticamente idéntico para ambas condiciones. A pesar de la menor difusión experimentada por la luz en el punto de inyección en caso de pulido, la longitud de la fibra es tal que este efecto se reduce debido al acoplo modal y la atenuación diferencial de los modos. Así, la distribución de modos recibida en el extremo final de la fibra es prácticamente la misma con y sin pulido por lo que la dispersión modal permanece constante, resultado que concuerda con el obtenido en el análisis de las respuestas frecuenciales en el que se veía que el ancho de banda era prácticamente igual.

4.3.2 Perfiles radiales

Este apartado se centra en el análisis de los perfiles radiales de cada tramo de POF cuando se usa como bloque de inyección la fuente óptica que se empleó en el análisis de respuestas frecuenciales. Este sistema es menos flexible ya que no podemos variar el ángulo de inyección y no permite la caracterización completa de la fibra. Sin embargo, permitirá obtener resultados más realistas ya que hace uso de componentes habitualmente empleados en enlaces POF y a su vez facilita la conexión de la fibra haciendo posible el estudio de la inyección con el rabillo de SI-POF.

4.3.2.1 Influencia de las condiciones de inyección

En este subapartado se estudia cómo influyen las condiciones de inyección sobre los perfiles radiales. En la Figura 4.17 se representan los perfiles radiales a la salida de la fibra para dos de las longitudes estudiadas (25 y 75 metros). La correspondencia de colores es la siguiente: las curvas azules representan el perfil radial con inyección directa del láser (con y sin pulido), mientras que las curvas rojas representan la medida cuando la inyección se realiza con el rabillo de SI-POF.

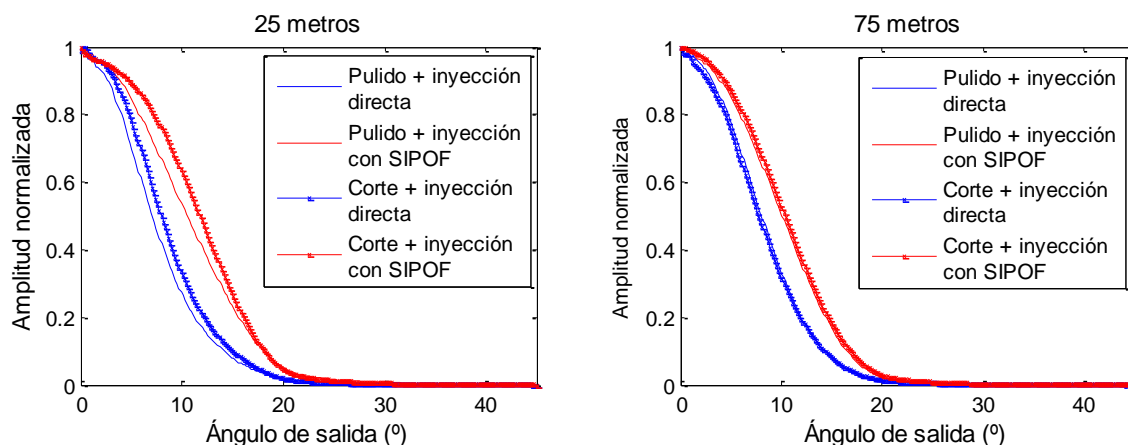


Figura 4. 17 Comparación de medidas aplicando pulido y cortes con inyección directa UFL o inyección con SI-POF OFL. Izquierda: 25 metros, Derecha: 75 metros.

De la misma forma que habíamos observado en las medidas de FFP con barridos angulares, cuando el extremo de la GI-POF está pulido, en el momento de la inyección la luz experimenta menor difusión y por tanto se obtiene un perfil radial a la salida más

estrecho que el correspondiente al caso sin pulido (curvas continuas frente a curvas con cruces). En cualquiera de las dos condiciones de inyección, el efecto del pulido se reduce al aumentar la longitud de la fibra como es esperable.

Por otro lado, comparando los perfiles radiales obtenidos con inyección directa con los obtenidos con inyección con rabillo se observa un efecto análogo. Al realizar inyección con SI-POF (inyección OFL) el perfil radial a la salida de la fibra es más ancho que cuando se realiza inyección directa. Este hecho provoca una mejora del ancho de banda tal y como se ha observado en el apartado anterior.

4.4 Ejemplo de aplicación. Análisis del BER

Después de caracterizar las propiedades de transmisión de la GI-POF vamos a analizar su comportamiento en un sistema digital realista. Uno de los parámetros fundamentales para caracterizar el funcionamiento de un sistema digital es la Tasa de Error Binario (BER), que indica con que exactitud puede el receptor determinar el estado lógico de cada bit transmitido. Se trata de un parámetro estadístico que depende de la duración de la ventana temporal utilizada. Actualmente los sistemas de comunicaciones trabajan con un BER de 10^{-6} , lo que significa que permitimos que haya un error cada 10^6 bits enviados [25].

El sistema utilizado para la medida del BER consta de tres dispositivos: el generador de secuencias pseudoaleatorias y analizador de errores OptoBER de Optellent, la placa de control con el transceptor de POF (FOT-FOR) y el osciloscopio Infiniium DCA para realizar la adquisición. Además se dispone del software necesario para controlar todos los parámetros. En la Figura 4.18 aparece un esquema del sistema utilizado.

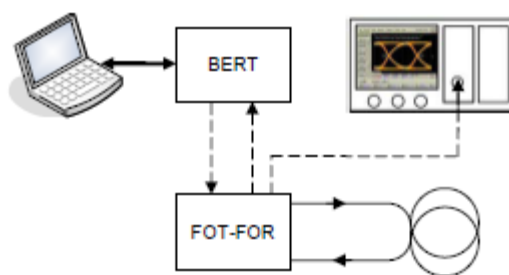


Figura 4. 18 Sistema experimental utilizado para medir el BER [26].

La fuente óptica que contiene el transceptor es un láser que trabaja en 650 nm. Este láser emite con una potencia baja con respecto a los requerimientos de la fibra estudiada. Debido a esta limitación en potencia, en estudios anteriores se ha comprobado que la longitud más larga que podemos llegar a medir para una tasa de transmisión de 1.25 Gb/s son 62 metros [26]. Por lo tanto la longitud más larga que se va a analizar son los 50 metros disponibles en el laboratorio además del carrete de 25 metros, ambos con la superficie pulida para maximizar el acoplo de luz a la fibra.

En la Figura 4.19 aparecen los diagramas de ojo para el tramo de 50 metros, ya que dentro de la similitud que existe con el de 25 metros es en el que más se aprecian las diferencias.

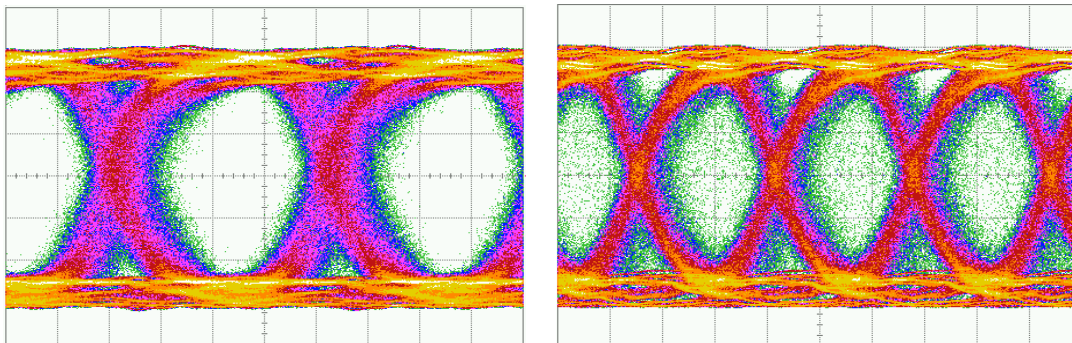


Figura 4. 19 Diagramas de ojo en 50 metros. Izquierda: Tasa de transmisión 1200 Mb/s. Derecha: Tasa de transmisión 1750 Mb/s.

A la izquierda, el diagrama de ojo está completamente abierto indicando la ausencia de error en 1200 Mb/s. Al aumentar la tasa de transmisión el diagrama de ojo se cierra progresivamente. En 1750 Mb/s nos encontramos en el límite en el que todavía es posible realizar la adquisición de la señal pero ya contiene un error alto. A partir de tasas más elevadas la detección resulta muy difícil o imposible de realizar.

La Figura 4.20 representa el BER medido en función de la tasa de transmisión para las dos longitudes. Dentro de los patrones de datos que permite seleccionar el software de control se ha elegido el PRBS7, que presenta patrones de 2^7-1 bits.

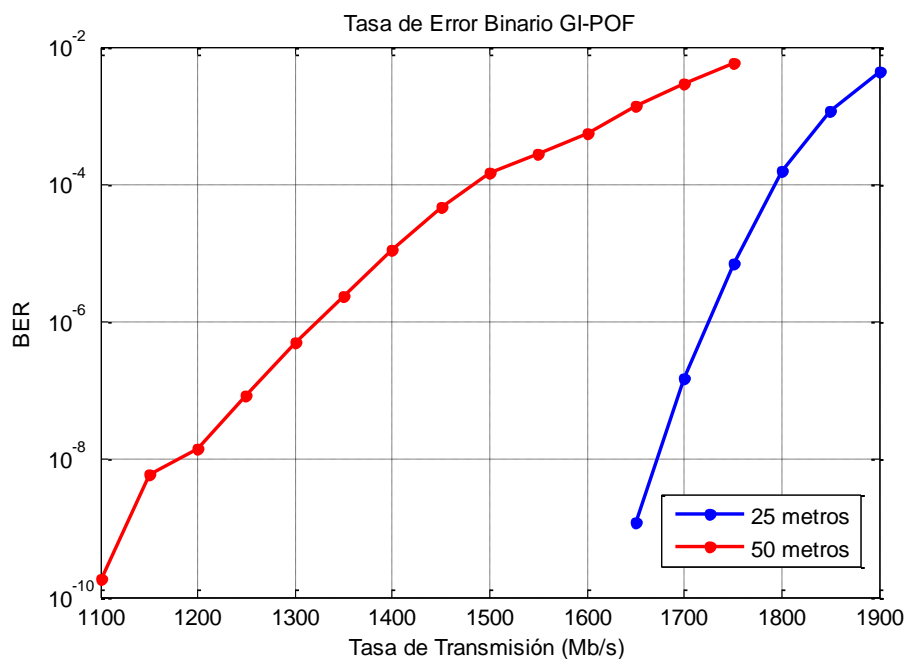


Figura 4. 20 Medida del BER en 25 y 50 metros de GI-POF.

En el caso de 50 metros se obtiene una tasa de transmisión con $\text{BER} = 10^{-6}$ de 1320 Mb/s. En 25 metros la tasa de transmisión es de 1720 Mb/s. Este experimento demuestra el potencial de la GI-POF en enlaces de datos que requieran gran ancho de banda. En concreto, si comparamos con las medidas de respuesta frecuencial presentadas anteriormente, en el caso del enlace de 50 metros podríamos afirmar que la tasa de transmisión máxima aparece limitada por la combinación de ancho de banda y atenuación presentados por la fibra. En cambio, en el caso del enlace de 25 metros para el que ha resultado imposible estimar el ancho de banda de la fibra (superior a 2.5 GHz) la máxima tasa de transmisión está limitada por la atenuación de la fibra.

5. Conclusiones y líneas futuras

El principal objetivo de este proyecto ha consistido en la realización de una caracterización completa de la fibra óptica de plástico de índice gradual. Dentro de esta caracterización se han analizado la atenuación espectral, las respuestas frecuenciales y el comportamiento espacial. A continuación se exponen las conclusiones extraídas de este trabajo y las posibles líneas futuras.

5.1 Conclusiones

Comenzando con el análisis de la atenuación espectral se comprueba que efectivamente, como se estudió en la teoría, la fibra óptica de plástico de índice gradual tiene mayor atenuación que la de salto de índice, aproximadamente el doble.

En cuanto a la caracterización de las respuestas frecuenciales, se ha partido de un montaje preliminar para llevarla a cabo. Debido a las buenas prestaciones en cuanto a ancho de banda de esta fibra, ha sido necesario invertir buena parte del tiempo en estudiar y optimizar cada uno de los elementos del sistema para poder medir en un rango de frecuencias elevado. Los resultados obtenidos en función de la longitud, aunque presentan un comportamiento heterogéneo, demuestran que esta fibra permite obtener un ancho de banda mucho mayor que el de su predecesora, la fibra óptica de plástico de salto de índice. Además se ha verificado la fuerte dependencia de los resultados con las condiciones de inyección. Por ello se ha hecho un análisis en profundidad que ha demostrado la reducción del ancho de banda cuando se pule la superficie y se inyecta con un láser comercial altamente elíptico, efecto que desaparece cuando la inyección se realiza a través de un rabillo de fibra óptica de salto de índice. Cuando se utiliza el rabillo se observa la misma respuesta frecuencial independientemente del estado de la superficie de la fibra además de que el ancho de banda aumenta respecto de la inyección directa. En cuanto a la variabilidad, cuando se utiliza el láser comercial se obtienen medidas muy variables debido a su patrón altamente elíptico, al contrario que ocurre al inyectar uniformemente en toda la superficie con el rabillo de fibra. Para concluir con el análisis de las condiciones de inyección también se ha aplicado un *scrambler*, si bien sólo ha sido posible considerar el tramo más corto de fibra, por lo que la influencia sobre el ancho de banda no es significativa.

Con el objetivo de conocer cómo es la propagación de luz en el dominio del espacio en función de la longitud se ha analizado el campo lejano, que además ayuda a explicar los comportamientos de las respuestas frecuenciales cuando se modifican las condiciones de inyección. Con el láser de He-Ne del laboratorio que emite un haz de luz colimado se realizan barridos angulares. Estas medidas muestran como en este tipo de fibra la luz se transmite predominantemente por el centro de la misma y da lugar a distribuciones espaciales de potencia similares en todas las longitudes a diferencia de la fibra óptica de salto de índice. Al comparar estos resultados se aprecia claramente que la dispersión modal introducida por la fibra estudiada es mucho menor, contribuyendo a su mayor

ancho de banda. En este apartado de análisis se han realizado cortes y pulidos en la superficie de la fibra cuyos resultados nos han permitido explicar el efecto de estas condiciones de inyección en las respuestas frecuenciales. Se comprueba que en la longitud más corta de 25 metros con pulido se transmiten modos más externos, que provocan mayor dispersión modal y menor ancho de banda tal y como se veía en la respuesta frecuencial de ese mismo tramo. En la longitud larga de 75 metros ya no afecta prácticamente el estado de la superficie de la fibra. Para terminar con las medidas de campo lejano se analizan los perfiles radiales con el láser comercial utilizado anteriormente. El análisis de los perfiles radiales con las distintas condiciones de inyección muestra que cuando la luz inyectada contiene potencia en ángulos mayores (acoplo con raballo de SI-POF) la anchura aumenta con respecto a la inyección directa. Este hecho, a su vez, mejora el ancho de banda de forma contraria a lo que ocurre en SI-POF lo que requiere de un análisis en profundidad de esta dependencia.

Por último, se han realizado medidas de BER sobre un enlace de datos usando transeptores comerciales de POF que han demostrado su excelente capacidad de transmisión. El hecho de que la fibra estudiada tenga una atenuación mayor que la SI-POF hace que esta pueda llegar a resultar un factor limitante. Sin embargo, es previsible que dado su gran ancho de banda, las GI-POF permitan cubrir en un futuro próximo la demanda de capacidad en escenarios de muy corto alcance.

5.2 Líneas futuras

Los resultados obtenidos en esta caracterización experimental dejan abiertas varias líneas de trabajo que completan este trabajo, éstas son las siguientes:

Definir el modelo matemático de la GI-POF con todos los datos generados en esta caracterización ya que será muy útil en sistemas de simulación. Los pasos a realizar serían los siguientes:

- Verificar si el modelo matemático desarrollado para la SI-POF sirve para modelar esta fibra.
- Añadir al modelo de SI-POF los parámetros o modificaciones oportunas para convertirlo en un modelo válido para GI-POF.

Caracterizar experimentalmente el ancho de banda de la fibra variando la apertura numérica de la inyección. De esta manera se puede simular la emisión de los distintos tipos de láseres existentes en el mercado que emiten con distintas aperturas y así comprobar su influencia en el ancho de banda.

Realizar un estudio detallado del efecto de las curvaturas al igual que se ha hecho en proyectos anteriores de SI-POF para comprobar cómo de perjudiciales son a la hora de utilizar esta fibra en entornos reales.

Referencias

- [1] K. Nagayama, M. Katui, M. Matsui, T. Saitoh y Y. Chigusa, «Ultra Low Loss (0.1484 dB/km) Pure Silica Core Fibre and Extension of Transmission Distance,» *Electronics Letters*, 2002, pp. 1168-1169.
- [2] J. Mateo, M. A. Losada y A. López, «Application of the plastic optical fibre in domestic multimedia networks,» de *Proceeding of the 3rd International Conference on Transparent Optical Networks - Mediterranean Winter Conference (ICTON-MW)*, 2009.
- [3] M. Atef y H. Zimmermann, «Optical Communication over Plastic Optical Fibers,» Springer, 2013.
- [4] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés y J. Zubia, Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers, *Opt. Express*, vol. 14, 2006, pp. 9028-9035.
- [5] M. A. Losada, J. Mateo, D. Espinosa, I. Garcés y J. Zubia, «Characterisation of the far field pattern for plastic optical fibers,» de *Proceedings of the 13th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Nuremberg (Alemania), 2004.
- [6] J. Mateo, M. A. Losada, J. J. Martínez-Muro, I. Garcés y J. Zubia, «Bandwith measurement in POF based on general purpose equipment,» de *Proceedings of the 14th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Hong-Kong (China), 2005.
- [7] Y. Koike, «High-bandwidth graded-index polymer optical fiber,» *Polymer*, 1991.
- [8] A. Berganza, «Estudio y Caracterización de las Fibras Ópticas de Plástico Mulinúcleo,» Tesis Doctoral, UPV, Bilbao, 2013.
- [9] Y. Koike, E. Nihei, N. Tanio y Y. Ohtsuka, «Graded-index plastic optical fiber composed of methacrylate and vinyl phenylacetate copolymers,» *Applied Optics*, 1990.
- [10] Y. Ohtsuka, E. Nihei y Y. Koike, «Graded-index optical fibers of methyl methacrylate-vinyl benzoate copolymer with low loss and high bandwidth,» *Applied Physics Letters*, Julio 1990.

- [11] H. Murofushi, «Low loss perfluorinated POF,» de *International Conference on Plastic Optical Fibres and Applications*, París (Francia), 1996.
- [12] M. A. Losada y J. Mateo, «Short Range (in-buildings) Systems and Networks: A chance for Plastic Optical Fibers,» Universidad de Zaragoza.
- [13] A. Flor, A. López, D. Richards, M. A. Losada, J. Mateo y J. Zubia, «POF 2015. Performance of electronic equalization techniques applied to POF links,» 2015.
- [14] G. A. Hockman y K. C. Kao, «Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies,» *Proceedings IEE*, 1966.
- [15] A. López, «Optical and Microwave Data Transmission Systems for Last Mile, Fiber to the Home FTTH, In house Networks, LAN- and MAN- Applications,» de *Optical Communications and Related Microwave Techniques*, Ed. 2015.
- [16] J. Mateo, I. Garcés y M. A. Losada , «Dispositivos y Sistemas de Transmisión Óptica,» 2013.
- [17] J. Zubia y J. Arrue, «Plastic optical fibers: An introduction to their processes and applications,» Bilbao, Diciembre 2000.
- [18] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow y W. Daum, «POF Handbook. Optical Short Range Transmission Systems,» Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [19] J. Japanese Industrial Standard, «Test Methods for Attenuation of All Plastic Multimode Optical Fibers,» 1990.
- [20] M. A. Losada, J. Mateo, I. Salinas, D. Izquierdo y I. Garcés, «Laboratorio de Comunicaciones Ópticas. Anexo I. Práctica 3: Estándares de medida de atenuación espectral y longitud de onda de corte,» Universidad de Zaragoza.
- [21] S. Ramón, «Medida de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de plástico de múltiples núcleos mediante un analizador de redes vectorial,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Zaragoza, 2015.
- [22] P. L. Carro, F. Lera y Í. Salinas, «Propagación y medios de transmisión. Tema 1: Líneas de transmisión,» 2014.
- [23] J. J. Martínez, «Desarrollo de sistemas de medida de ancho de banda en fibra óptica de plástico: Estudio comparativo.» Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza, 2004.

- [24] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Arrue, J. Zubia y D. Kalymnios, «High NA POF Dependence of Bandwidth on Fibre Length,» de *Proceedings of the 12th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Seattle (EE. UU.), 2003.
- [25] M. A. Losada, J. Mateo, D. Izquierdo y I. Garcés, «Anexo 3. Práctica 7: Fibra óptica de plástico. Obtención de BER y diagrama de ojo».
- [26] A. López, P. Heredia, J. Mateo y M. Á. Losada, «Transmission performance of POF Ethernet links built with commercial transceivers». *Proceeding of the 3rd International Conference on Transparent Optical Networks - Mediterranean Winter Conference (ICTON-MW)*, 2009.

ANEXO I. Parámetros de transmisión

En este anexo se describen los parámetros más relevantes de las fibras ópticas en general, atenuación y dispersión, así como dos de los parámetros de la fibra óptica de plástico en particular, el acoplo modal y la atenuación diferencial.

I.1 Atenuación

Se denomina atenuación a la pérdida de potencia que sufre la luz transportada por una fibra óptica durante su propagación. Su valor es dependiente con la longitud de onda debido a la contribución de varios efectos a su vez dependientes de ésta. Por un lado la luz es absorbida en distinta medida por el medio a través del que pasa y es difundida por el material del núcleo o en la interfaz núcleo-cubierta. Por otro lado, cuando la luz se encuentra con curvaturas o imperfecciones es radiada en forma de energía luminosa. La reducción en potencia entre los dos extremos de un tramo de fibra se expresa en decibelios, a través de la expresión definida como:

$$\alpha = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \quad (\text{I.1})$$

donde P_e y P_s son las potencias de entrada y salida respectivamente.

La humedad y la temperatura cambian ligeramente el espectro de absorción. También la atenuación es sensible a las condiciones de fabricación de la fibra, que pueden hacer que, incluso en un mismo carrete, varíen las cifras de pérdidas.

Los mecanismos básicos que provocan pérdidas ópticas en la POF pueden clasificarse en dos grupos: *intrínsecos*, que dependen principalmente del material y *extrínsecos*, debidos a causas como los procesos de fabricación o el envejecimiento. El mecanismo que más influye en la atenuación es el intrínseco ya que no puede reducirse sin cambios drásticos en la composición de la fibra a diferencia del extrínseco, que puede reducirse perfeccionando el proceso de fabricación.

En la figura se compara el espectro de atenuación de fibras con núcleo de PMMA de SI al de otras fibras (GOF, fibras de vidrio; PCS, fibras de vidrio con cubierta de plástico; PF, fibras de plástico perfluorinadas).

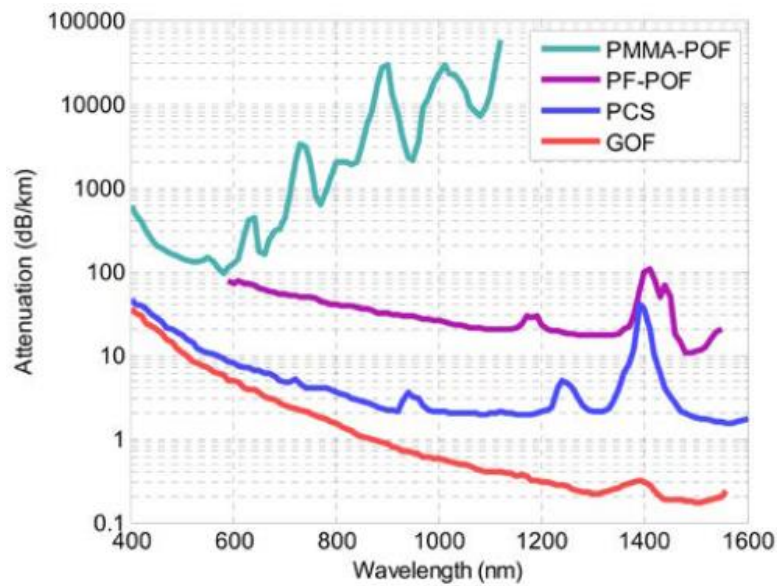


Figura I. 1. Atenuaciones espectrales de distintos tipos de fibras ópticas [18].

I.2 Dispersión

Se denomina dispersión a la diferencia en la velocidad de propagación de diferentes componentes de la potencia óptica. Esta diferencia en la velocidad provoca ensanchamiento de los pulsos a medida que se propagan, deformándolos, acarreado errores que provocan fallos en recepción que perjudica la comunicación.

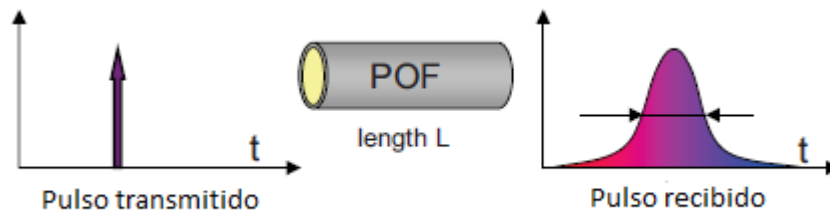


Figura I. 2 Efecto de la dispersión en la fibra [18].

Existen fundamentalmente dos tipos de dispersión que afectan a la POF: dispersión material y la dispersión intermodal, propias de las fibras multimodo.

- *Dispersión material:* Cada modo propaga todas las líneas espectrales correspondientes a las longitudes de onda del emisor, ya que su anchura espectral no es nula. De este modo, como a cada longitud de onda le corresponde una velocidad de propagación, tendremos dentro de cada modo una velocidad distinta para cada longitud de onda transmitida, originándose este tipo de dispersión.

- *Dispersión intermodal:* Provocada por las distintas velocidades de propagación de los distintos modos. Dos rayos de igual longitud de onda que incidan simultáneamente pero con direcciones distintas llegarán en instantes diferentes al extremo receptor. Además, debido al fuerte acoplo modal (transferencia de energía de unos modos a otros) la potencia puede cambiar de dirección durante su propagación lo que hace más complicado un estudio de esta limitación.

Este segundo tipo es el que predomina en las fibras de plástico PMMA, debido al gran número de modos que se propagan por ellas. Por este motivo se propone el uso de GI-POF para compensar las velocidades de propagación de los modos, construyéndose así fibras con núcleos de índice gradual que permiten atenuar las limitaciones por dispersión intermodal y alcanzar tasas de transmisión mayores.

I.3 Acoplo modal

El acoplo modal es el efecto producido cuando se transfiere potencia de unos modos a otros. Puede ser producido por pequeñas imperfecciones del núcleo de la fibra que modifican la trayectoria de los modos, así como en la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento.

En GI-POF como no existe un salto brusco del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento se reduce el acoplo modal respecto de la SI-POF, haciendo que éste parámetro no sea influyente en las medidas.

I.4 Atenuación diferencial

La atenuación diferencial está referida a las diferentes atenuaciones que experimentan los modos dependiendo del ángulo con que se transmiten. Se produce principalmente por la diferencia de distancias que recorren los modos, los que viajan por el exterior sufren más atenuación que los que viajan por el interior. Además, en la GI-POF también afecta el perfil del índice de refracción. Para formar el perfil de índice de refracción gradual, la fibra se compone por concentraciones de dopantes que varían desde el eje de la fibra hasta su extremo. Esto provoca que la atenuación también tenga un perfil gradual, siendo los modos que viajan por las zonas más externas los que más atenuación sufren. Éste es el parámetro que más afecta a la GI-POF.

ANEXO II. Fundamentos de los componentes del sistema de medida de respuesta frecuencial

- Analizador de redes vectorial. Parámetros S

El analizador de redes vectorial es un equipo que permite la caracterización de dispositivos de N puertos, midiendo propiedades tanto de amplitud como de fase, generalmente para grandes rangos de altas frecuencias. La característica principal es que permiten medir los parámetros S o de *scattering* los cuales nos indican el nivel de transferencia de señal y adaptación de los puertos.

La figura II.1 muestra un esquema que representa las ondas de potencia de entrada y salida de una red de dos puertos:

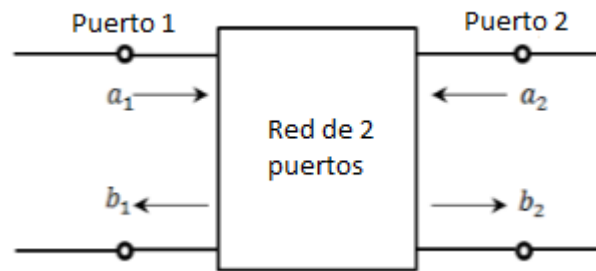


Figura II. 1 Distribución de las ondas de potencia de entrada y salida de una red de dos puertos.

Esta red puede ser caracterizada desde el exterior mediante las relaciones de potencias entrantes y salientes siguientes:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad [b] = [S][a] \quad (\text{II. 1})$$

donde a_i es la onda de potencia incidente por la puerta i , b_j es la onda de potencia reflejada por la puerta j y $[S]$ es la matriz de scattering o dispersión.

Las ondas de potencia pueden calcularse a partir de las tensiones e intensidades en el puerto como:

$$a_i = \frac{V_i + I_i Z_{0i}}{2\sqrt{Z_{0i}}} \quad b_i = \frac{V_i - I_i Z_{0i}}{2\sqrt{Z_{0i}}} \quad (\text{II. 2})$$

En la matriz S , los términos de la diagonal S_{ii} se corresponden con el coeficiente de reflexión en el puerto i cuando el resto de puertos están adaptados. Los términos fuera

de la diagonal se interpretan como coeficientes de transmisión equivalentes a inyectar potencia en el puerto i con el resto de puertos adaptados y observar cuánta sale por el puerto j . A partir de las ondas de potencia los podemos calcular de la siguiente manera:

$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} \Big|_{a_j=0} \quad S_{ji} = \frac{b_j}{a_i} \Big|_{a_j=0} \quad (\text{II.3})$$

A la hora de medir el ancho de banda con el analizador hay que tener en cuenta que el fotodiodo del detector convierte la potencia óptica proporcional a la corriente, es decir, la potencia eléctrica a la salida del detector es equivalente a la potencia óptica al cuadrado. Así pues, para medir el ancho de banda óptico a 3 dB, en el analizador será necesario determinar el ancho de banda eléctrico a 6 dB.

- Diodo láser

Un diodo láser (LD) es un dispositivo semiconductor que emite luz por emisión estimulada. Se dice que produce radiación coherente ya que además de ser monocromática también es monofásica, es decir, todas las ondas están en fase lo que produce un haz de luz muy preciso.

El parámetro fundamental de un LD es la potencia óptica emitida frente a la intensidad de corriente que se le aplica. En función de la corriente de polarización aplicada distinguimos dos zonas de funcionamiento separadas por la intensidad umbral, I_{th} . indica el valor a partir del cual se produce la emisión estimulada propia del láser. Cuando la corriente de polarización es menor que I_{th} en el láser se produce emisión espontánea, es decir, se comporta como si fuera un LED. Cuando la corriente de polarización es suficiente como para superar la I_{th} , se produce un aumento de la emisión estimulada que genera luz coherente y un gran aumento de la potencia de emisión, en esta situación se dice que nos encontramos en zona láser. En la Figura II.2 se representa la curva característica de los LDs potencia-corriente.

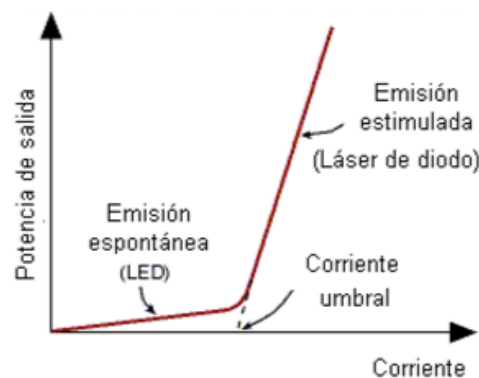


Figura II. 2 Curva I-P general de un diodo láser.

- Detector

Para captar la luz procedente de la fibra utilizamos un fotodetector que realice la conversión de la señal óptica recibida a una señal eléctrica. Este proceso está basado en el efecto fotoeléctrico, el cual mediante la absorción de fotones puede dar lugar a la generación de electrones y, por tanto, a una corriente eléctrica proporcional al número de fotones absorbidos.

El ancho de banda del detector se calcula con la expresión II.4 proporcionada por el fabricante, obteniendo un valor teórico de 530 MHz para el detector utilizado en el sistema experimental.

$$f_{BW} = \frac{1}{2 * \pi * R_{load} * C_j} \quad (II.4)$$

ANEXO III. Configuración del sistema de medida de respuesta frecuencial.

Después de realizar varias medidas con diferentes amplificadores y observar en todas un patrón de interferencias similar, se decide llevar a cabo el proceso de medida en un lugar que no se vea afectado por la radiación externa para descartar o confirmar esta posibilidad. Para ello se decide trasladar los equipos de medida al sótano del edificio contiguo Torres Quevedo. Una vez que se realizan medidas para cada una de las longitudes de fibra que estudiamos y son procesadas, se comprueba que esas interferencias permanecen iguales a pesar de estar en un lugar donde la radiación externa es menor. Comprobamos entonces que no se trata de radiación externa de otros elementos sino que el problema se encuentra en la configuración del sistema.

Para comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos por el VNA y descartar que sea el propio equipo el que introduce las interferencias no deseadas, se realiza un experimento de control que consiste en tomar las medidas en el dominio del tiempo con un osciloscopio para ver el comportamiento de las señales. Para ello se sigue el método de barrido de tonos que se explica a continuación.

- Método de barrido de tonos

Se corresponde con el procedimiento que realiza un analizador de redes sólo que este proceso se realiza de manera individual para cada frecuencia. A pesar de que la obtención de una sola respuesta frecuencial es muy lenta en comparación con el barrido que hace el analizador de redes, este método aporta ciertas ventajas. El hecho de tener cada medida individual sabiendo su frecuencia nos permite tratarlas individualmente para eliminar el ruido o las posibles interferencias. La Figura III.1 muestra esquema del sistema utilizado:

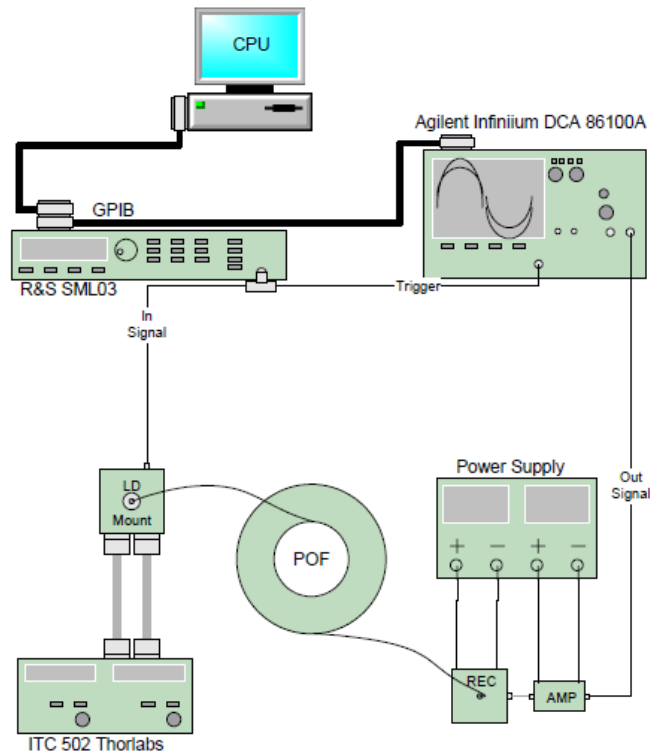


Figura III. 1 Esquemático del sistema experimental para llevar a cabo el método de barrido de tonos.

El procedimiento a seguir es sencillo, consiste en generar tonos puros mediante un generador de señales en un rango determinado de frecuencias. Cada uno de estos tonos modula el láser con el que inyectamos luz en la fibra y es transmitido a través de la fibra hasta llegar al fotodiodo que actúa como detector. Una vez la señal es detectada se amplifica y se introduce al osciloscopio.

A partir de una cierta frecuencia el nivel de ruido aumenta considerablemente hasta el punto de que la señal recibida queda enmascarada. Para reducir el nivel de ruido se aplica un promediado sobre la señal, que a pesar de aumentar el tiempo de adquisición, disminuye de manera considerable el pedestal de ruido haciendo posible la medida de un rango de frecuencias mucho mayor.

Para pasar las señales guardadas en el osciloscopio del dominio del tiempo al frecuencial se aplica sobre ellas la transformada de Fourier. De esta forma se observa el tono de la frecuencia transmitida de una forma más clara ya que se ve el pico de señal sobre el pedestal de ruido. Nos interesa registrar la amplitud de cada uno de ellos, que si sigue un comportamiento lógico será menor cuanto mayor sea la frecuencia. Una vez que tenemos la amplitud de todos los tonos en el dominio frecuencial si los representamos todos en una misma gráfica en función del rango de frecuencia medido podemos ver una aproximación, más o menos precisa en función de la cantidad de tonos medidos, de la respuesta frecuencial de nuestro sistema. Comprobamos que después de transformar al dominio frecuencial existe una clara correspondencia con lo que obtenemos en el VNA, lo que incrementa la fiabilidad las conclusiones tomadas.

Resultados:

Tras analizar el comportamiento de las señales en el dominio del tiempo para todas las longitudes, vemos que para frecuencias altas todavía podemos recuperar la senoide en detección. Sin embargo, a pesar de que la senoide enviada la recuperamos en recepción, a partir de un cierto valor de frecuencia se aprecia un comportamiento muy variable en las amplitudes de ésta. Lo normal sería que conforme aumentamos la frecuencia la señal tenga cada vez más atenuación hasta desaparecer y no este comportamiento tan irregular.

Además al distanciar emisor del receptor (ligeramente ya que la distribución no permite más) la amplitud disminuye. También notamos este efecto al colocar una placa metálica delante del detector. Por tanto, se deduce que la señal que obtenemos se corresponde con la que estamos enviando pero no llega a través de la fibra, sino que se está radiando por el aire y el receptor la capta con mayor o menor intensidad dependiendo de la distancia a la que se encuentra del emisor.

A continuación se barajan dos hipótesis: la primera que se plantea es que sea nuestro propio sistema el que genere las interferencias, radiándose en el emisor parte de la señal y el receptor actuando como antena. La segunda posibilidad es que a través de la red eléctrica del laboratorio se esté filtrando esta radiación.

Solución aplicada:

Se comprueba mediante el aumento de la distancia entre los extremos emisor y receptor que parte de la señal estaría siendo radiada y recibida por el aire. Por otra parte, no se descarta que la red eléctrica también esté transmitiendo parte de la señal que se recibe. Así, en el montaje definitivo el emisor se conecta en una de las bancadas del laboratorio y el detector a la de al lado. Además, de esta manera tenemos más margen de separación entre emisor y detector.

Se decide así mismo utilizar una referencia de 2 metros, ya que una vez que se mide un carrete de fibra larga con el emisor y receptor lejos, es necesario aproximarlos de nuevo para tomar la referencia. Así pues, al no permanecer en la misma posición las condiciones del entorno varían falseando las medidas. De esta manera emisor y receptor permanecen alejados todo el tiempo y no varían las condiciones del entorno. Con esta distribución se obtiene una medida más limpia que nos permite observar más rango de señal sin ruido ni interferencias.

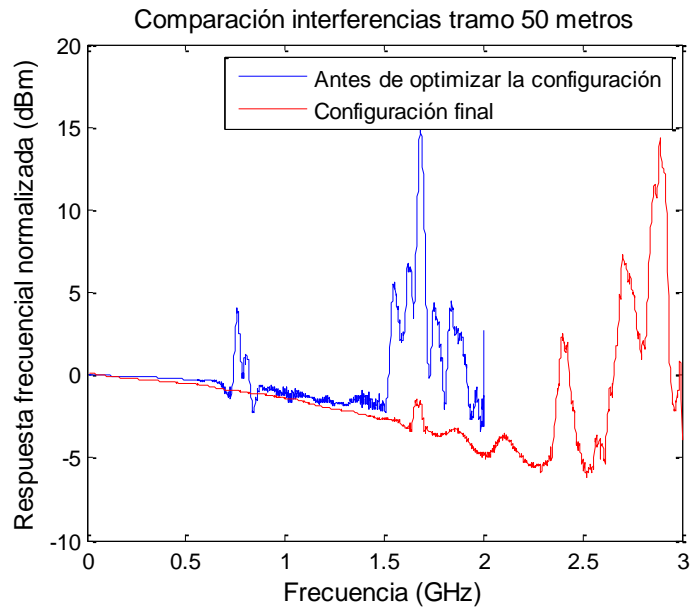


Figura III. 2 Comparación de las interferencias antes y después de optimizar la configuración.

- Intensidad de polarización y potencia de RF

Existe un compromiso entre la intensidad de polarización del láser y la potencia de RF de la modulación. Para determinar estos parámetros hay que tener en cuenta la intensidad máxima de trabajo que es capaz de soportar el láser y la intensidad umbral, es decir, la mínima intensidad que debemos aplicar para que trabaje en zona láser.

La intensidad de polarización que se aplica modifica el nivel de continua de la señal óptica transmitida y la potencia de RF define su amplitud. Por tanto, debemos controlar estos parámetros de tal manera que siempre se cumpla la siguiente condición:

$$I_{th} < I_{op} < I_{op\ max} \quad \Rightarrow \quad 40\ \text{mA} < I_{op} < 110\ \text{mA}$$

Cuando optimizamos la potencia transmitida, tenemos que tener en cuenta dos situaciones. Por un lado, la potencia de la portadora de RF debe ser la más alta posible siempre y cuando se cumpla la condición anterior y no saturemos el amplificador. Y por otro lado, la intensidad con la que se alimenta el láser también tiene que ser la máxima que nos permita el sistema para disponer del máximo nivel de potencia posible en detección y así ser capaces de detectar la señal en longitudes largas. Cuanto mayor sea la corriente de polarización del láser menos potencia de RF podremos aplicar para no exceder el límite superior. Para cuantificarlo tenemos que definir la relación que existe entre la potencia de RF y el valor de su amplitud. Sabiendo el valor de continua y la amplitud de la señal podemos calcular para cada valor de corriente de polarización del láser la máxima potencia de RF que es posible aplicar.

A continuación se realiza la transformación para obtener la intensidad media a partir de la potencia de RF.

$$\left. \begin{array}{l} v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_v) \\ i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_I) \end{array} \right\} p(t) = v(t) \cdot i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \phi_v) \cos(\omega t + \phi_I)$$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\phi_v - \phi_I) + \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \phi_v + \phi_I) \quad (\text{III. 1})$$

La potencia media se calcula como el valor medio en un periodo T_0 : $P_m = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} p(t) dt$

$$P_m = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\phi_v - \phi_I) = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta) \quad (\text{III. 2})$$

Utilizamos los fasores de intensidad y voltaje para hallar $\cos(\theta)$.

$$\left. \begin{array}{l} \bar{V} = V_m e^{j\phi_v} \\ \bar{I} = I_m e^{j\phi_I} \end{array} \right\} Z = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{V_m}{I_m} e^{j(\phi_v - \phi_I)} = |Z| e^{j\theta} = R + jX = |Z| \cos(\theta) + j|Z| \sin(\theta)$$

$$R = |Z| \cos(\theta) \quad \Rightarrow \quad \cos(\theta) = \frac{R}{|Z|} \quad ; \quad |Z| = \frac{V_m}{I_m} \quad (\text{III. 3})$$

Resultando la potencia en función de la intensidad como:

$$P_m = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta) = \frac{V_m I_m}{2} \frac{R}{|Z|} = \frac{I_m^2}{2} R = \frac{I_m^2}{2} Re[Z] \quad (\text{III. 4})$$

Esta relación nos permite determinar la potencia de RF que es posible aplicar dentro de los límites establecidos anteriormente. En la Tabla II.1 aparece un resumen del valor de amplitud que toma cada potencia de RF para $Re[Z]$ igual a 50Ω .

Pot RF (dBm)	I (mA)
10,00	20,00
8,00	15,89
6,00	12,62
4,00	10,02
2,00	7,96
0,00	6,32

Tabla II. 1 Valor de la amplitud para cada potencia de RF.

Tomando la máxima potencia que permite el VNA igual a 10dBm calculamos los valores máximos y mínimos de la sinusoide para un rango de intensidades de polarización.

	I _{pol} (mA)			
	60	70	80	85
I _{max} (mA)	80	90	100	105
I _{min} (mA)	40	50	60	65

Tabla II. 2 Valores máximos y mínimos de la amplitud de señal para diferentes valores de corrientes de polarización y potencia de RF igual a 10 dB.

Aunque con 85mA se cumple la condición, vemos que la I_{max} se encuentra muy próxima al límite superior. Por tanto, la intensidad de polarización elegida es 80mA para una potencia de RF igual a 10 dBm ya que está dentro de los valores típicos de operación del láser.

- Otros parámetros

En la Tabla II.3 se resumen el resto de parámetros óptimos que tenemos que configurar para tener la máxima resolución posible.

Parámetro	Valor
Número de puntos	1601
Ancho de banda filtro IF	5 KHz
Frecuencia start	10 MHz
Frecuencia stop	3 GHz
Voltaje alimentación amplificador	12 V

Tabla II. 3 Resumen del resto de parámetros óptimos de la configuración.

- Estudio de las referencias

Este análisis se realiza para ver a partir de qué valores se satura el amplificador.

La respuesta frecuencial capturada por el VNA a la salida del amplificador sólo presenta el nivel de potencia de RF. El detector elimina la componente de continua, por tanto, no le afecta la intensidad de polarización del láser siempre y cuando sea suficiente como para ser detectada.

Realizamos un barrido de potencias de RF para cada intensidad de polarización del láser y obtenemos en todos los casos el mismo nivel de señal salvo en frecuencias bajas, que para potencias de RF altas vemos como se satura la referencia.

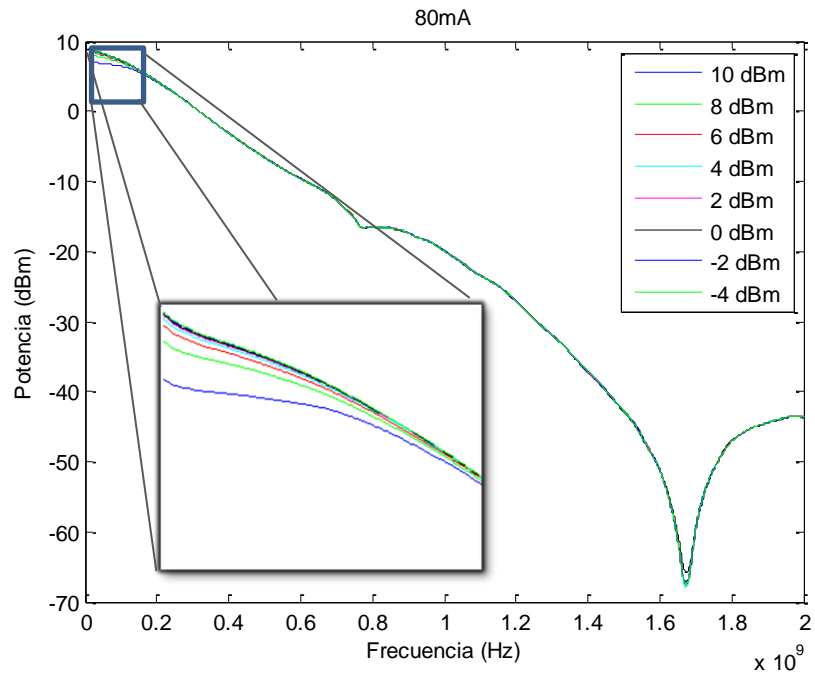


Figura III. 3 Comparación de la respuesta frecuencial de la referencia para distintas potencias de RF.

Para realizar las medidas en las mismas condiciones, cuando obtengamos la respuesta de la referencia cambiaremos la potencia de RF a 0dBm para evitar esta saturación.

ANEXO IV. Preparación de los extremos de POF

El estado de los extremos de la fibra tiene una gran influencia en los resultados obtenidos. Una correcta preparación de la fibra permite maximizar el nivel de potencia a la salida de la fibra, que como ya se ha visto a lo largo de este trabajo es el principal factor limitante en el estudio realizado. El primer paso que se realiza cuando se trabaja con POF es el corte y después el pelado, a diferencia de las GOF en las que se realiza en el orden inverso. Después la superficie se pule para dejarla libre de irregularidades.

- Corte: Se utiliza la cortadora *Fiber Cutter* de la figura IV.1 que permite realizar un corte perpendicular a la fibra. Se trata de una cortadora para fibra de plástico simple y doble de 1.5 y 2 mm con cubierta.



Figura IV. 1 Cortadora Fiber Cutter para POF.

- Pelado: La peladora elegida es la *Micro-Strip™ precisión stripper* de la figura IV.2 que permite retirar la cantidad de recubrimiento deseado en función del conector empleado.



Figura IV. 2 Peladora Micro-Strip para POF.

- Pulido: Este paso tiene gran importancia ya que una superficie uniforme y libre de irregularidades permite maximizar la potencia inyectada. El pulido se realiza en la mayoría de situaciones aunque en este trabajo también se ha comprobado qué efecto producen las superficies sin pulir.

Para llevar a cabo este proceso se necesitan dos lijas, una de grano grueso y otra de grano fino, una base donde apoyarlas, un disco para soportar la fibra con el correspondiente conector situándola perpendicular a la superficie y el líquido de pulido. La metodología consiste en realizar unos 30 giros en forma de 8 sobre la lija más gruesa y después sobre la fina impregnadas con el líquido de pulido. De esta manera el pulido se realiza de forma homogénea en toda la superficie.

ANEXO V. Software utilizado

- Atenuación espectral

Primero se utiliza el programa en LabView *Lockinserver.exe* para maximizar la inyección de luz. Aporta los valores de frecuencia de modulación (arriba), potencia óptica media (centro) e instantánea (abajo).

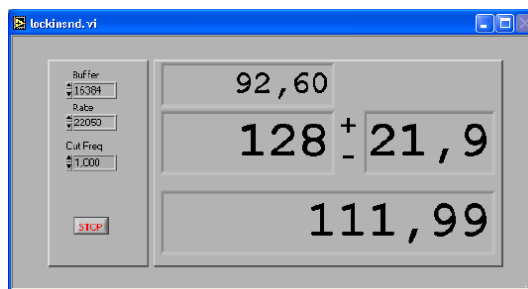


Figura V. 1 Programa Lockinserver.exe

Para la toma de datos se utiliza un programa en Visual Basic sobre una hoja de Microsoft Excel. Este programa se encarga de mover el monocromador en el rango de longitudes de onda indicado, toma los datos de *Lockinserver.exe* y los guarda en la hoja Excel.

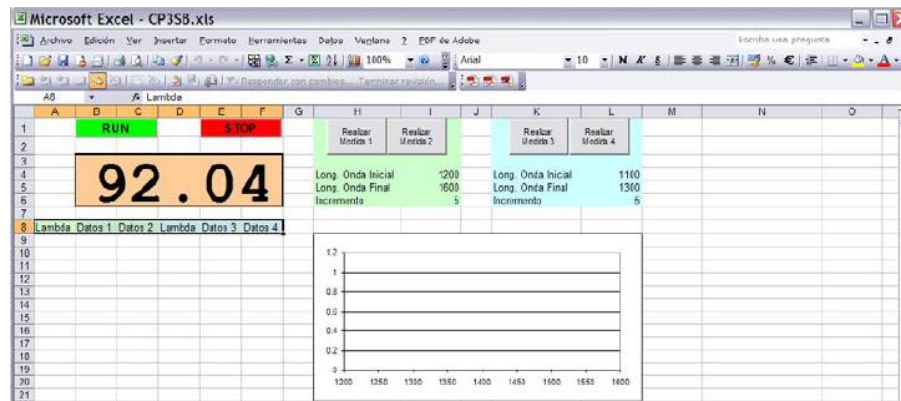


Figura V. 2 Entorno medida atenuación espectral.

- Respuestas frecuenciales

En este apartado se utiliza un programa realizado en un Trabajo Fin de Grado anterior desarrollado en el entorno de Matlab. Este programa permite capturar la información del analizador de redes en tiempo real, almacenar su información y procesarla. Además en caso de que la medida lo posibilite devuelve el valor del ancho de banda a 6 dB.

Ancho de Banda POF

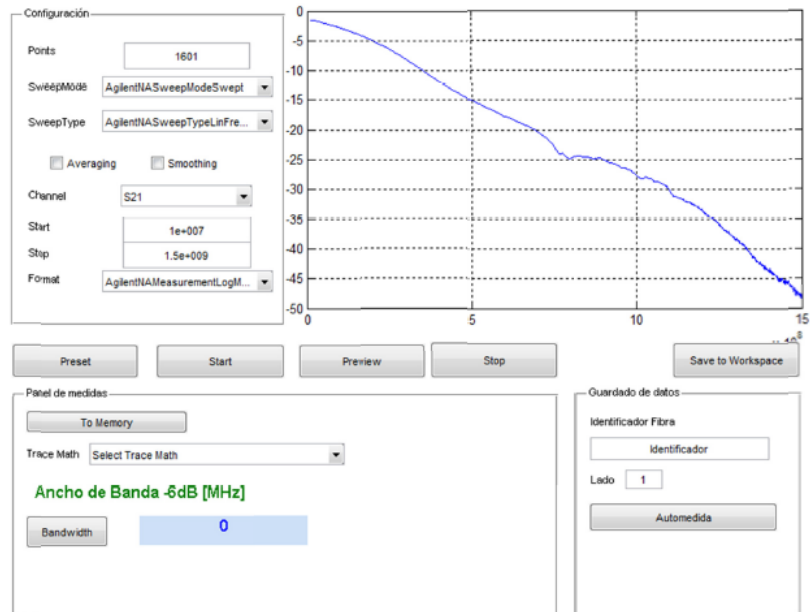


Figura V. 3 Entorno de medida de las respuestas frecuenciales.

- Campo lejano

En este apartado se utiliza un programa desarrollado en LabView. Como se ve en la interfaz de la figura muestra la imagen captada por la cámara (parte superior izquierda), esa misma imagen umbralizada (inferior izquierda), el perfil radial (superior derecha) y el perfil radial simetrizado (inferior derecha). Además muestra el valor de la posición angular, la posición del centroide y los parámetros para el control de la cámara.

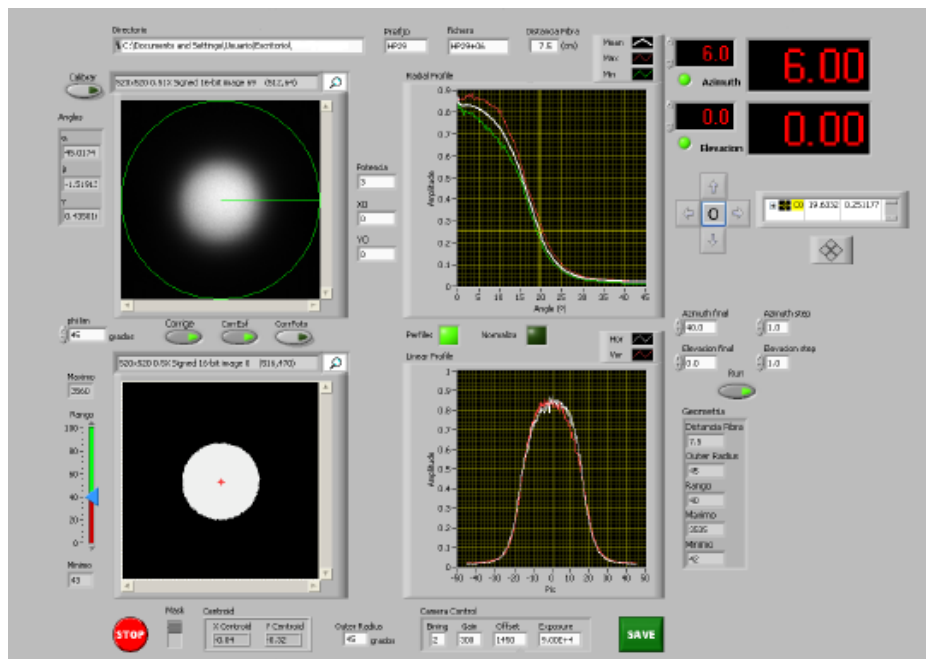


Figura V. 4 Entorno de medida del campo lejano.

- BER

En el apartado de medida del BER se utiliza de nuevo un programa desarrollado en LabView que permite modificar tanto la tasa de transmisión como el patrón de datos que se desea transmitir. En el apartado de resultados de la izquierda devuelve el valor del BER instantáneo y el número de errores recibidos. A la derecha el programa permite realizar un barrido en función de la tasa de transmisión que representa en la gráfica.

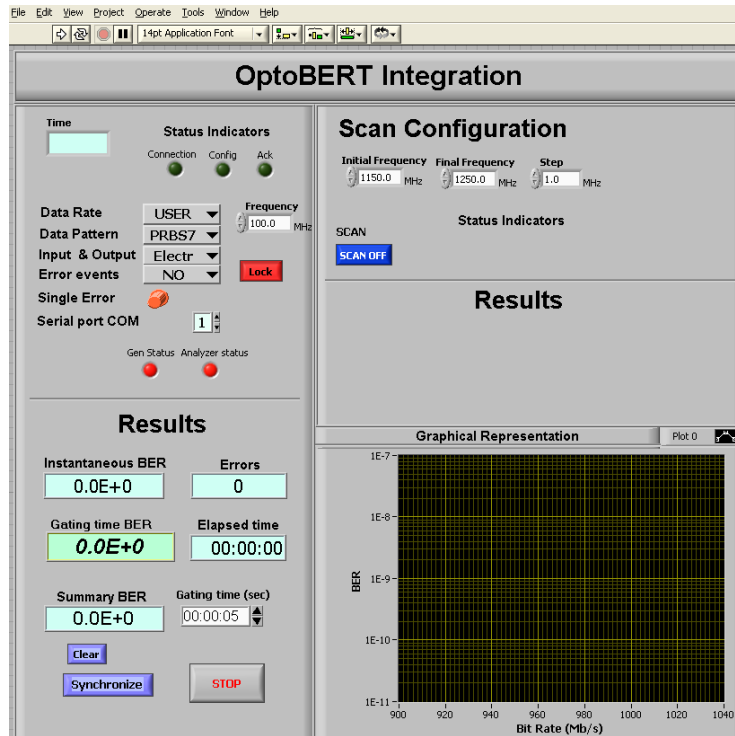


Figura V. 5 Entorno de medida del BER.

ANEXO VI. Hojas de características

RED LASER DIODE DL-5147-042

SANYO

Ver.1 July. 2002

Features

- Short wavelength : 655 nm (Typ.)
- High output power : 30 mW at 60°C (CW)
- Low threshold current : I_{th} = 40 mA (Typ.)
- Small package : ø5.6 mm
- TE mode

Applications

Bar-code scanner

Absolute Maximum Ratings

(T_c=25°C)

Parameter		Symbol	Rated	Unit
Light Output	CW	P _o (CW)	30	mW
	Pulse ¹⁾	P _o (pulse)	50	
Reverse Voltage	Laser	V _R	2	V
	PD		30	
Operating Temperature		T _{opr}	-10 to +60	°C
Storage Temperature		T _{stg}	-40 to +85	°C

1) Pulse Width 0.5μs, Duty 50%

Electrical and Optical Characteristics

2) 3)

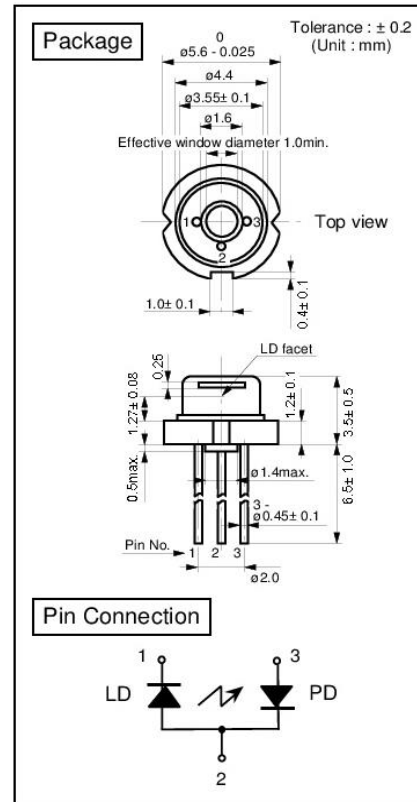
(T_c=25°C)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Threshold Current	I _{th}	CW	-	40	50	mA
Operating Current	I _{op}	P _o =30mW	-	80	110	mA
Operating Voltage	V _{op}	P _o =30mW	-	2.4	2.8	V
Lasing Wavelength	L _p	P _o =30mW	-	655	665	nm
Beam ⁴⁾ Divergence	Perpendicular	Q _v	15	23	28	°
	Parallel	Q _h	6	7	10	°
Off Axis Angle	Perpendicular	dQ _v	-	-	± 3	°
	Parallel	dQ _h	-	-	± 3	°
Differential Efficiency	dP _o /dI _{op}	-	-	0.75	-	mW/mA
Monitoring Output Current	I _m ⁵⁾	P _o =30mW	0,1	0.3	-	mA
Astigmatism	A _s	P _o =30mW	-	10	-	μm

2) Initial values 3) All the above values are evaluated with Tottori Sanyo's measuring apparatus

4) Full angle at half maximum

Note : The above product specification are subject to change without notice.

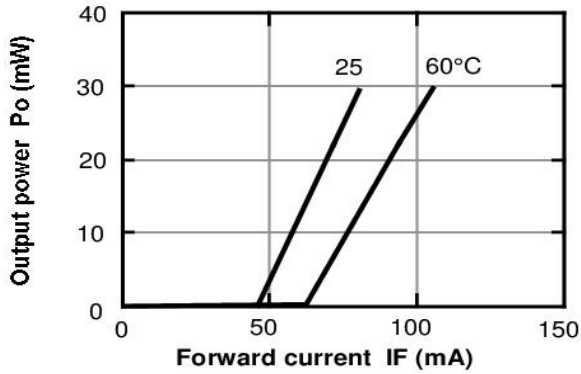


Tottori SANYO Electric Co., Ltd.
5-318, Tachikawa, Tottori 680-8634 Japan

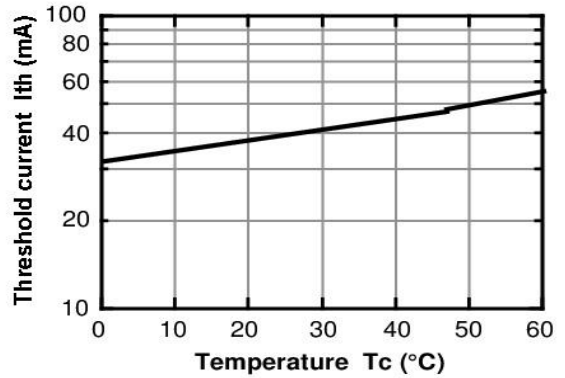
LED Division
TEL : +81-857-21-2137 FAX : +81-857-21-2161

Characteristics

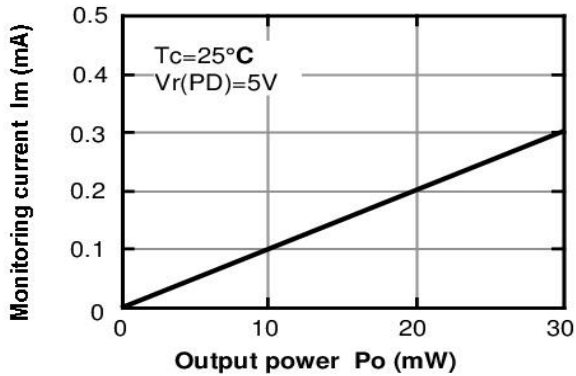
Output power vs. Forward current



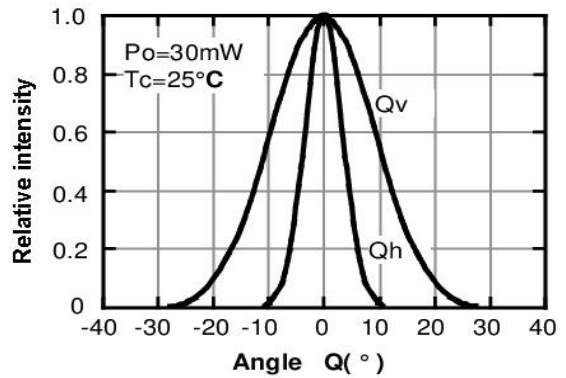
Threshold current vs. Temperature



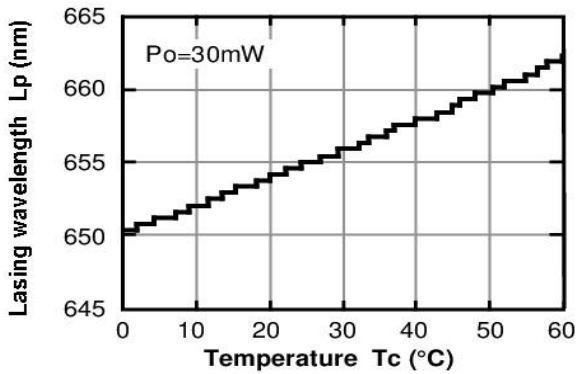
Monitoring current vs. Output power



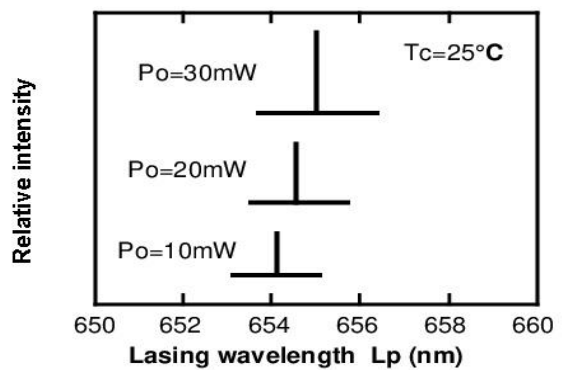
Beam divergence



Lasing wavelength vs. Temperature



Lasing wavelength vs. Output power



This is typical data and it may not represent all products.



LDM9T Laser Mount with TEC and Controller

User Guide



Chapter 8 Specifications

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

*Modulate Low Frequencies Through LD Controller

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

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

RF Modulation

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

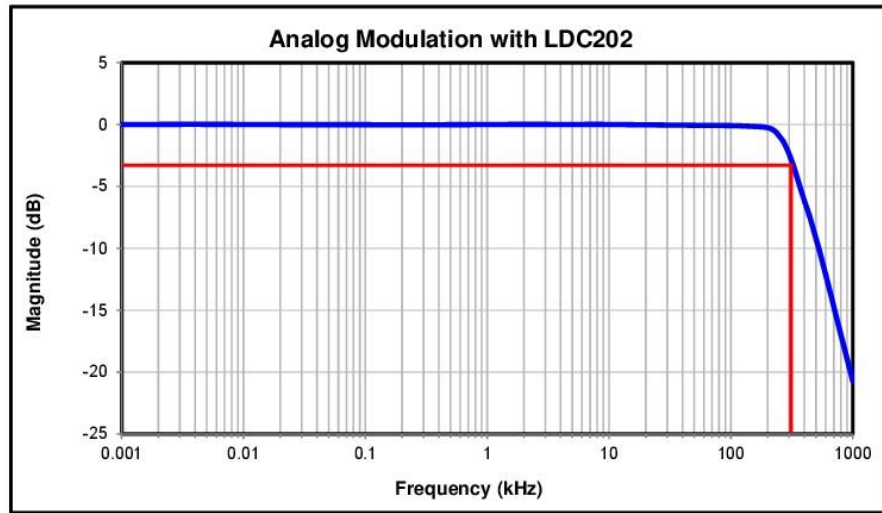


Figure 10 Low Frequency Modulation Through LD Controller

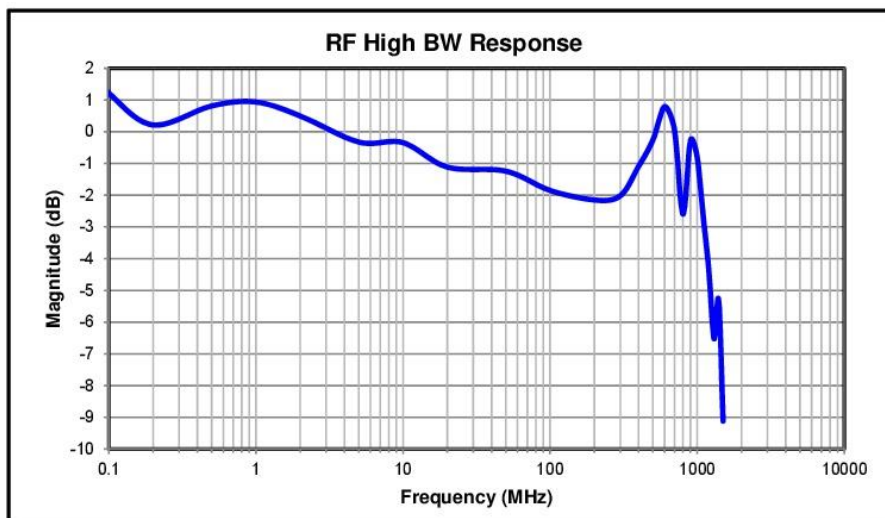
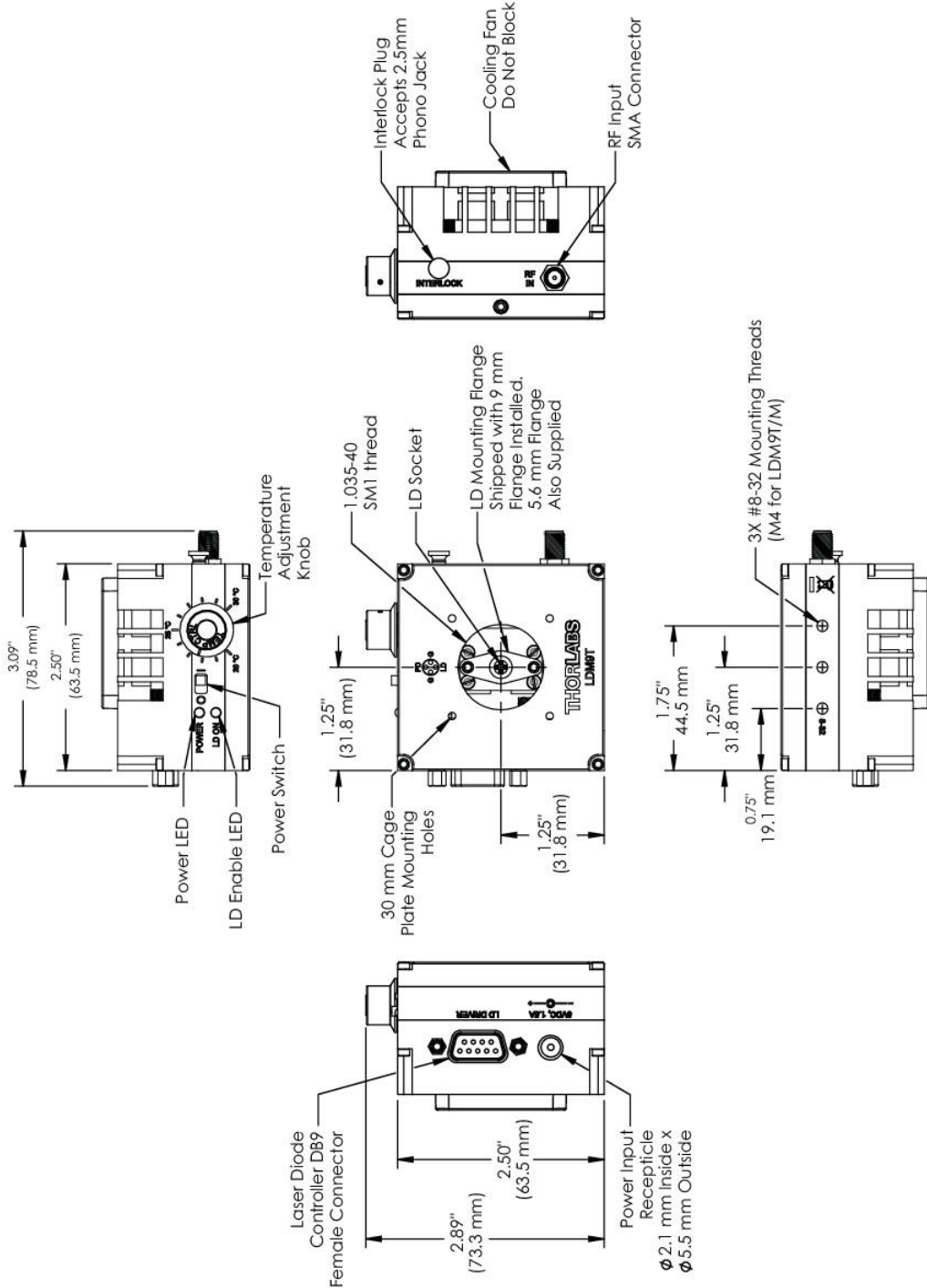


Figure 11 RF Modulation Through SMA Connector on LM9LP

Chapter 9 Mechanical Drawing



THORLABS

**DET10A(/M)
Si Biased Detector**

User Guide



Chapter 7 Specifications

All measurements performed with a 50 Ω load unless stated otherwise.

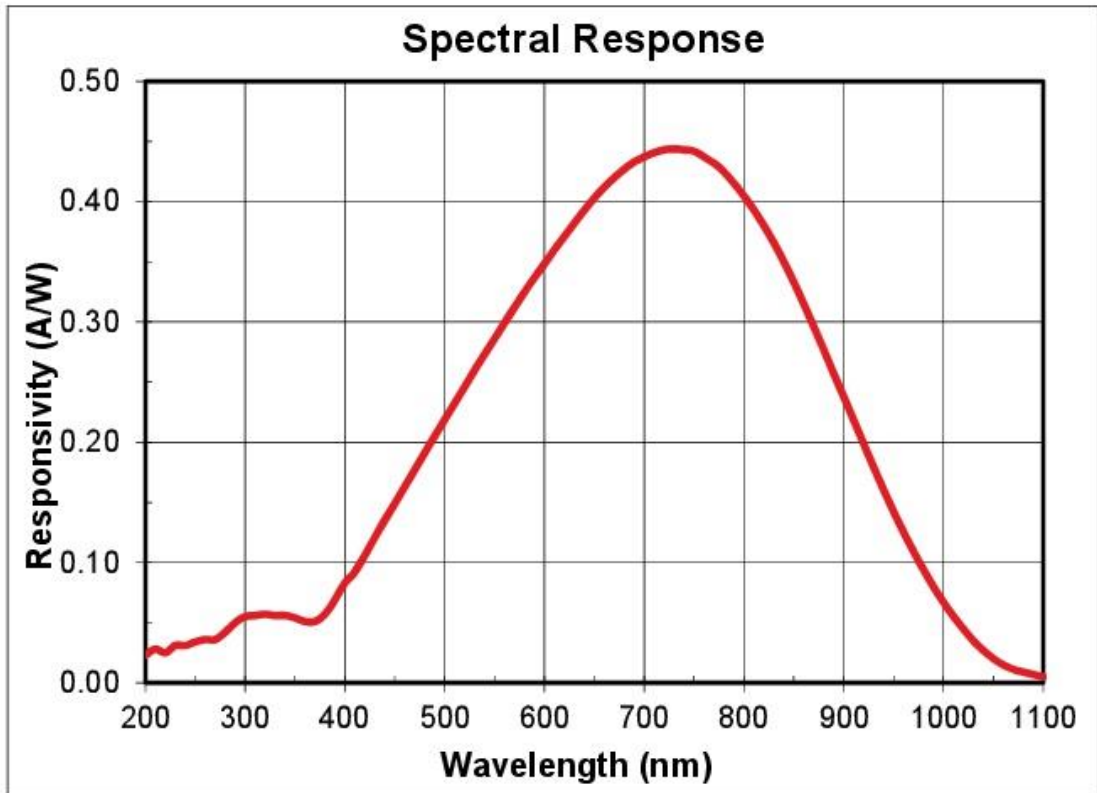
Electrical Specifications		
Detector		Silicon
Active Area		$\varnothing 1.0$ mm (0.8 mm ²)
Wavelength Range	λ	200 to 1100 nm
Peak Wavelength	λ_p	730 nm (typ)
Peak Response ²	$\Re(\lambda_p)$	0.44 A/W (typ)
Shunt Resistance	R_{sh}	1 G Ω (typ)
Diode Capacitance	C_J	6 pF (typ)
Rise Time ^{2,3}	t_r	1 ns (typ)
NEP (830 nm, 10 V)	W/ \sqrt{Hz}	1.2×10^{-13} (typ)
Photodiode Bias Voltage	V_R	10 V
Dark Current ² (with 1 M Ω Load)	I_D	0.3 nA (Typ) 2.5 nA (Max)
Output Voltage	V_{OUT}	0 to 10 V
General		
On/Off Switch		Slide
Battery Check Switch		Momentary Pushbutton
Output		BNC (DC Coupled)
Package Size		2.8" x 1.9" x 0.83" (70 mm x 48 mm x 21 mm)
PD Surface Depth		0.13" (3.4 mm)
Weight		0.2 kg
Accessories		SM1T1 Coupler SM1RR Retainer Ring
Storage Temp		-20 to 70 $^{\circ}C$
Operating Temp		10 to 50 $^{\circ}C$
Battery		A23, 12 V _{DC} , 40 mAh
Low Battery Voltage ⁴		(See Battery Check)
V_{OUT} (Hi-Z)		~9 V
V_{OUT} (50 Ω)		~400 mV

² Measured with specified bias voltage of 5.0 V

³ Low battery voltage will result in slower rise times and decreased bandwidth.

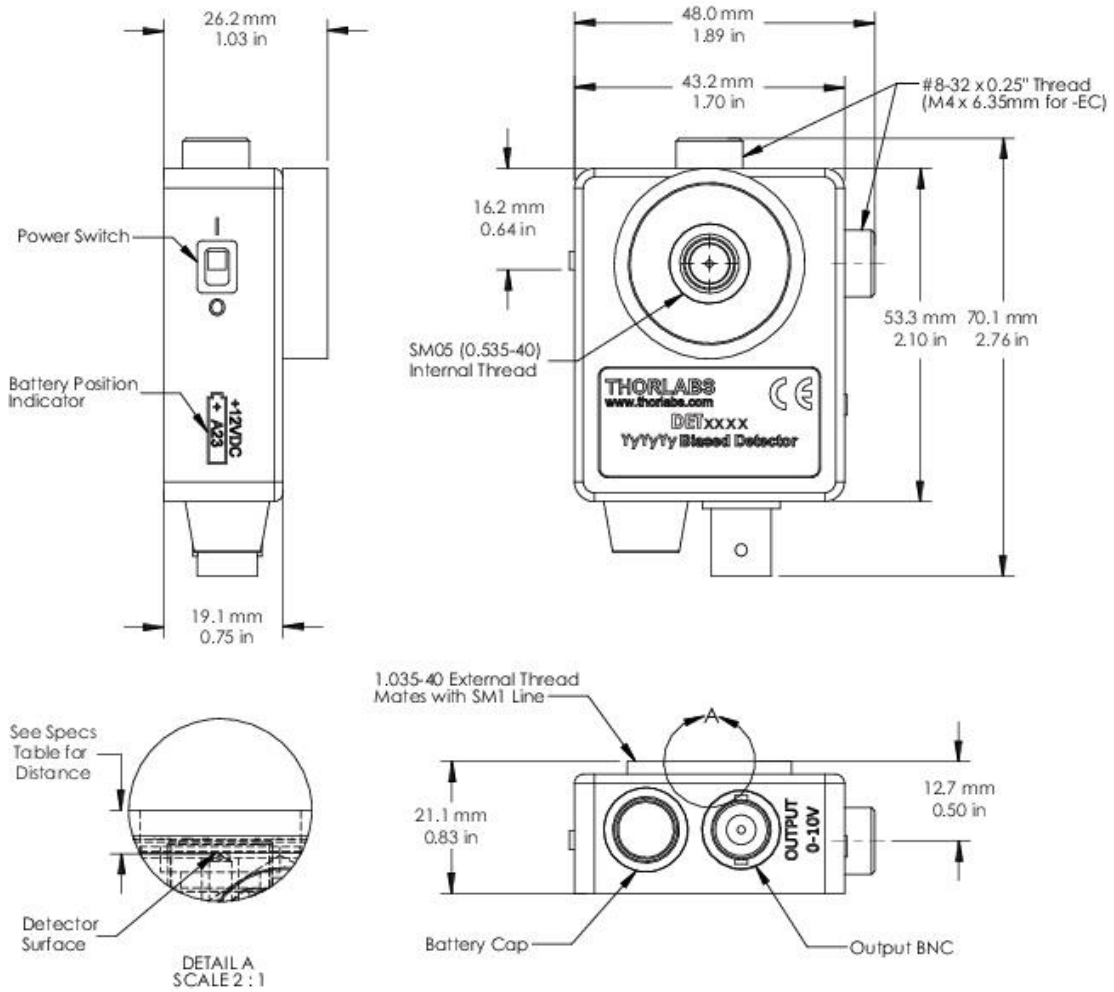
⁴ Assumes the battery voltage drops below 9.6 V. The reverse protection diode generates a 0.6 V drop.

7.1. Response Curve



7.2. Mechanical Drawing

Visit the web for a more detailed mechanical drawing.



Coaxial Amplifier

ZKL-1R5+

50Ω Medium Power 10 to 1500 MHz



Features

- wideband, 10 to 1500 MHz
- high IP3, +31 dBm typ.
- low noise, 3 dB typ.
- high gain, 40 dB typ.
- protected by US Patent, 6,943,629

Applications

- communication systems
- cellular
- satellite distribution
- GSM/ISM

CASE STYLE: BY493			
Connectors	Model	Price	Qty.
SMA	ZKL-1R5+	\$149.95 ea.	(1-9)

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

Amplifier Electrical Specifications at 25°C

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		GAIN (dB)			MAXIMUM POWER (dBm)			DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Typ.		DC POWER	
	f_L	f_U	Typ.	Min.	Flatness Max.	Min. Output (1 dB Compr.)		Input (no damage)	NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In	Out	Volt (V) Nom.	Current (mA) Max.
ZKL-1R5+	10	1500	40	36	±1.2	+15	+15	+13	3.0	+31	1.4	1.6	12	115

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

L= low range (f_L to $f_U/2$)

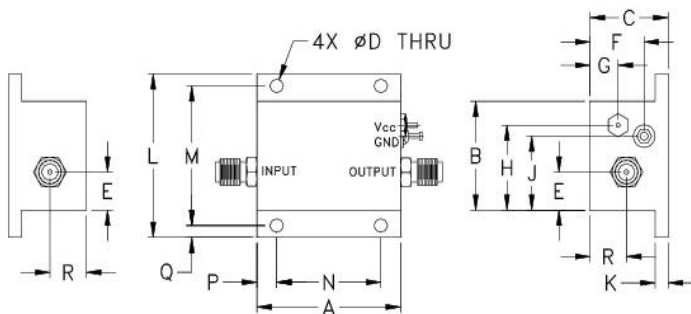
U= upper range ($f_U/2$ to f_U)

Maximum Ratings

Operating Temperature	-40°C to 75°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	+13V Max.

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

Outline Drawing



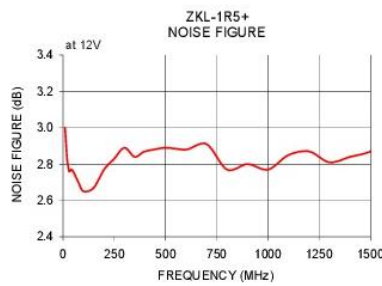
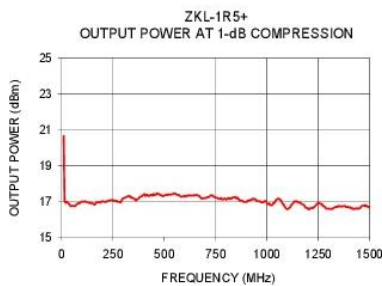
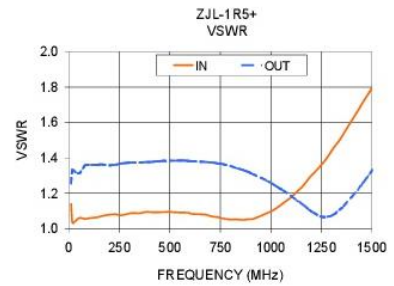
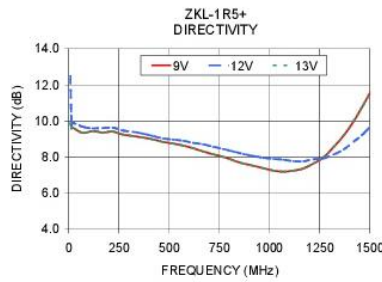
Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	wt
1.38	1.00	.75	.125	.35	.52	.27	.78	.68	.125	1.50	1.281	1.000	.19	.11	.35	grams
35.05	25.40	19.05	3.18	8.89	13.21	6.86	19.81	17.27	3.18	38.10	32.54	25.40	4.83	2.79	8.89	40

Notes

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

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	POUT at 1 dB COMPR. (dBm)
	9V	12V	13V	9V	12V	13V	IN	OUT	12V	12V
10.00	40.89	40.39	38.82	9.87	12.48	9.87	1.14	1.26	3.00	16.90
100.00	40.61	40.27	38.69	9.36	9.62	9.36	1.06	1.36	2.65	16.80
250.00	40.51	40.18	38.67	9.38	9.44	9.38	1.08	1.37	2.83	16.90
350.00	40.52	40.18	38.74	9.18	9.39	9.18	1.09	1.37	2.84	17.02
500.00	40.55	40.25	38.88	8.75	8.95	8.75	1.09	1.38	2.89	17.18
600.00	40.62	40.31	39.04	8.54	8.82	8.54	1.09	1.38	2.88	17.17
700.00	40.73	40.40	39.23	8.21	8.63	8.21	1.07	1.37	2.91	17.10
800.00	40.87	40.54	39.48	7.89	8.36	7.89	1.05	1.35	2.77	17.07
900.00	41.03	40.68	39.76	7.56	8.17	7.56	1.05	1.31	2.80	17.05
1000.00	41.20	40.83	40.04	7.29	7.95	7.29	1.10	1.26	2.77	17.04
1100.00	41.33	40.96	40.23	7.24	7.79	7.24	1.18	1.18	2.85	16.79
1200.00	41.39	40.99	40.29	7.50	7.80	7.50	1.30	1.10	2.87	16.80
1300.00	41.30	40.90	40.11	8.30	8.05	8.30	1.44	1.07	2.81	16.68
1400.00	41.02	40.62	39.62	9.66	8.64	9.66	1.61	1.18	2.84	16.70
1500.00	40.48	40.12	38.85	11.54	9.72	11.54	1.80	1.33	2.87	16.49
1500.00	40.48	40.12	38.85	11.54	9.72	11.54	0.00	0.00	2.87	16.49



Notes

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



Coaxial Amplifier

ZKL-2R5+ ZKL-2R5

50Ω Medium Power 10 to 2500 MHz



Features

- wideband, 10 to 2500 MHz
- high IP3, +31 dBm typ.
- low noise, 5 dB typ.
- rugged, shielded case
- protected by US Patent, 6,943,629

Applications

- communication systems
- cellular
- PCS
- GSM/ISM

Connectors	Model	Price	Qty.
SMA	ZKL-2R5(+)	\$149.95 ea.	(1-9)

+ RoHS compliant in accordance with EU Directive (2002/95/EC)

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

Amplifier Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		GAIN (dB)			MAXIMUM POWER (dBm)			DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Typ.		DC POWER	
	f_L	f_U	Typ.	Min.	Flatness Max.	Output (1 dB Compr.) L	U	Input (no damage)	NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In	Out	Volt (V) Nom.	Current (mA) Max.
ZKL-2R5(+)	10	2500	30	26	±1.5	+13	+11	+13	5.0	+31	1.4	1.4	12	120

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

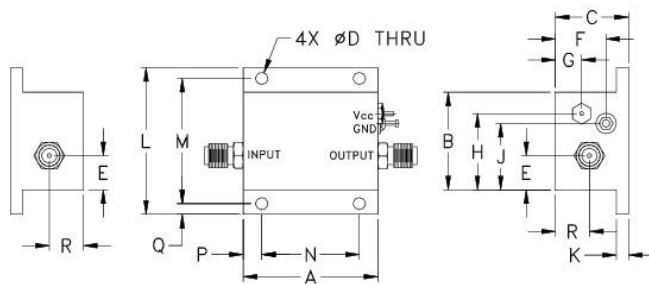
L= low range (f_L to $f_U/2$) U= upper range ($f_U/2$ to f_U)

Maximum Ratings

Operating Temperature	-40°C to 75°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	+13V Max.

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

Outline Drawing



Outline Dimensions (Inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	wt
1.38	1.00	.75	.125	.35	.52	.27	.78	.68	.125	1.50	1.281	1.000	.19	.11	.35	grams
35.05	25.40	19.05	3.18	8.89	13.21	6.86	19.81	17.27	3.18	38.10	32.54	25.40	4.83	2.79	8.89	40



P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661 The Design Engineers Search Engine Provides ACTUAL Data Instantly at minicircuits.com

RF/MICROWAVE COMPONENTS

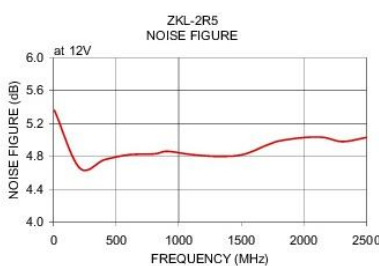
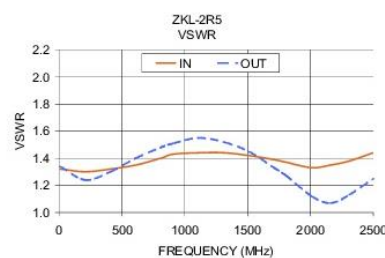
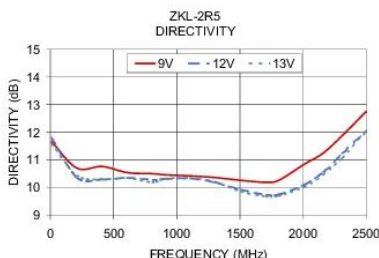
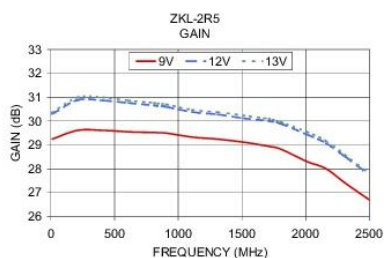
Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuit's website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp.

For detailed performance specs & shopping online see web site

REV. A
M122594
ZKL-2R5
100126
Page 1 of 2

Typical Performance Data/Curves

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	P _{OUT} at 1 dB COMPR. (dBm)
	9V	12V	13V	9V	12V	13V	IN	OUT		
10.00	29.24	30.29	30.35	11.67	11.80	11.57	1.32	1.34	5.36	18.24
210.00	29.61	30.88	30.99	10.71	10.37	10.45	1.30	1.24	4.66	18.61
410.00	29.61	30.86	30.99	10.77	10.30	10.31	1.32	1.30	4.76	18.77
610.00	29.55	30.76	30.86	10.55	10.36	10.35	1.35	1.40	4.82	18.72
810.00	29.52	30.66	30.76	10.51	10.29	10.20	1.40	1.48	4.83	18.76
910.00	29.49	30.59	30.69	10.47	10.32	10.33	1.43	1.51	4.86	18.65
1110.00	29.33	30.38	30.47	10.43	10.34	10.36	1.44	1.55	4.82	18.69
1310.00	29.24	30.28	30.37	10.37	10.19	10.21	1.44	1.52	4.80	18.74
1510.00	29.12	30.12	30.24	10.27	9.93	9.86	1.42	1.45	4.82	18.58
1710.00	28.94	30.00	30.09	10.20	9.74	9.69	1.39	1.33	4.94	18.35
1810.00	28.81	29.88	29.95	10.28	9.76	9.71	1.37	1.27	4.99	18.37
2010.00	28.31	29.44	29.55	10.85	10.11	10.03	1.33	1.12	5.03	18.15
2160.00	28.01	29.08	29.17	11.26	10.57	10.48	1.35	1.07	5.03	18.17
2310.00	27.41	28.51	28.59	11.89	11.24	11.09	1.38	1.13	4.98	17.72
2500.00	26.71	27.76	27.82	12.76	12.08	12.05	1.44	1.25	5.03	17.45



For detailed performance specs & shopping online see web site Page 2 of 2

P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661 The Design Engineers Search Engine www.minicircuits.com Provides ACTUAL Data Instantly at [minicircuits.com](http://www.minicircuits.com)

Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions. 3. The parts covered by this specification sheet are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp.

FiberFin®



OM-Giga-SE100

Graded-Index Plastic Optical Fiber

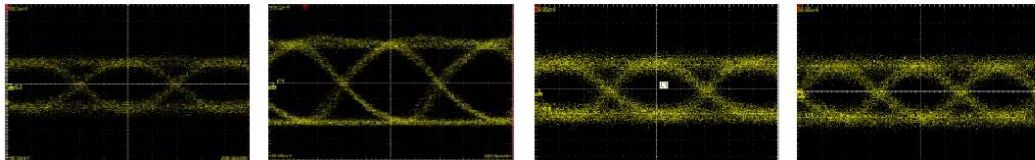
OM-Giga is a poly (methyl methacrylate)-based GI-POF for high-speed short-distance data-communication applications. It does not contain any refractive-index modifying dopant, and has excellent mechanical properties and thermal stability.

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

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

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

Eye - Pattern (Jacket Fiber)

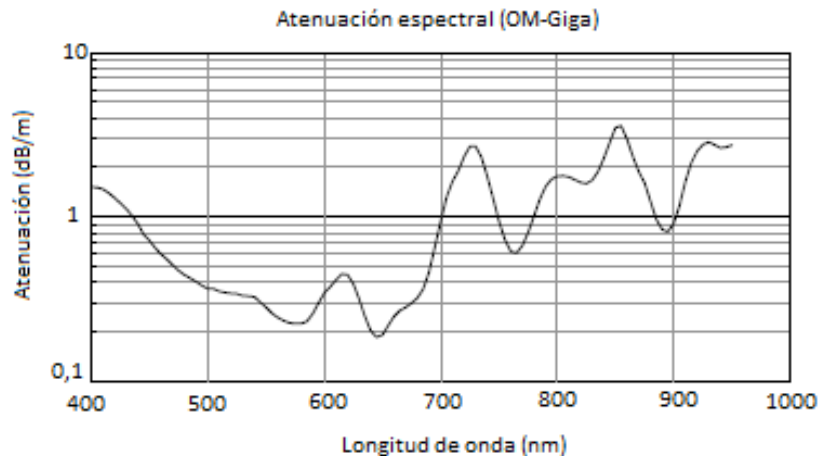


(a) 1.25 Gbps Back to Back

(b) 1.25 Gbps After 50m

(c) 1.25 Gbps After 100m

(d) 1.5 Gbps After 100m



HFBR-RXXYYY Series (POF)
HFBR-EXXYYY Series (POF)
 Plastic Optical Fiber Cable and Accessories
 for Versatile Link



Data Sheet



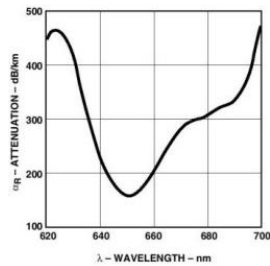
Cable Description

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

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

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

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



Features

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

Applications

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

Plastic Optical Fiber Specifications: HFBR-R/EXXYYY

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit	Note
Storage and Operating Temperature	T _{S,O}	-55	+85	°C	
Recommended Operating Temperature	T _O	-40	+85	°C	
Installation Temperature	T _I	-20	+70	°C	1
Short Term Tensile Force	Single Channel	F _T	50	N	2
	Dual Channel	F _T	100	N	
Short Term Bend Radius	r	25		mm	3, 4
Long Term Bend Radius	r	35		mm	
Long Term Tensile Load	F _T		1	N	
Flexing			1000	Cycles	4

Mechanical/Optical Characteristics, T_A = -40 to +85°C unless otherwise specified.

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

ANEXO VII. Diagrama de Gantt

	MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				
	SEMANAS																								
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Caracterización de los elementos del sistema de respuestas frecuenciales	█																								
Análisis de la mejor distribución del sistema		█	█	█	█																				
Optimización de parámetros			█	█																					
Medida de respuestas frecuenciales en función de las condiciones de inyección				█	█	█	█	█	█	█	█														
Medida de la atenuación espectral								█																	
Medida de campo lejano en función de las condiciones de inyección										█	█	█	█	█	█	█	█								
Evaluación de resultados																█	█	█	█	█	█	█	█		
Elaboración de la memoria												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		