

Trabajo Fin de Grado

Medida de la respuesta frecuencial en fibras
ópticas de plástico de múltiples núcleos mediante
un analizador de redes vectorial

Autor

Sergio Ramón Tarancón

Directora

Alicia López Lucia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2015

Medida de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de múltiples núcleos mediante un analizador de redes vectorial

RESUMEN

Las fibras ópticas de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*) son ampliamente utilizadas gracias a sus características físicas que simplifican el proceso de instalación y mantenimiento y reducen los costes. Por el contrario, estas fibras presentan limitaciones en cuanto al ancho de banda y al balance de potencias lo que restringe su ámbito de aplicación. En la búsqueda de menores atenuaciones y mayores anchos de banda, se han desarrollado las fibras POF de múltiples núcleos (MC-POF), que constituyen el eje central de este trabajo. El objetivo principal es la caracterización frecuencial de fibras MC-POF mediante un procedimiento experimental de medida basado en un analizador de redes vectorial (VNA).

En primer lugar, se ha diseñado un montaje experimental que permite medir la respuesta frecuencial de un enlace POF y que se basa en el método de barrido de frecuencias, que está estandarizado y es universalmente aceptado. Se ha considerado importante que el proceso de medida y obtención de datos del analizador de redes sea sencillo y por tanto, se ha desarrollado un *software* específico que se comunica con el VNA y automatiza la toma de datos.

Una vez se ha comprobado la correcta operación del montaje experimental y del *software* desarrollado, se han contrastado los resultados obtenidos mediante nuestro sistema de medida con otros obtenidos por el grupo en trabajos previos, enfocados a la caracterización frecuencial de fibras POF estándar de un único núcleo. Se han evaluado y justificado las diferencias encontradas, comprobándose que se deben principalmente a la geometría en el proceso de detección, lo que tiene una gran influencia en el ancho de banda ofrecido por la fibra.

Cómo última fase, se ha realizado la caracterización frecuencial de una fibra POF comercial de 19 núcleos. Este tipo de fibras no ha sido caracterizado previamente por el grupo de trabajo, por lo que los resultados resultan de gran interés para profundizar en el conocimiento de las fibras MC-POF. Se ha aplicado el método de corte, lo que ha permitido obtener el ancho de banda en función de la longitud de la fibra para un rango muy amplio de longitudes. Así mismo, se han tomado medidas adicionales, como la atenuación, el patrón de campo cercano o el patrón de campo lejano, que nos ayudarán a interpretar los resultados y serán clave para posteriores estudios sobre las POF de múltiples núcleos. Los resultados obtenidos demuestran que las características frecuenciales de las MC-POF son altamente dependientes de las condiciones de inyección de la luz a la fibra. En este sentido, se ha comprobado experimentalmente el efecto sobre el ancho de banda y la atenuación de la introducción de desalineamientos (longitudinal y transversal) en la inyección. Así mismo, se ha considerado la inyección a través de un tramo corto de POF de un único núcleo que permite uniformizar la potencia óptica inyectada en los núcleos. Finalmente, se han comparado las medidas de ancho de banda de tres tipos de fibra SC-POF y la fibra MC-POF, obtenidas todas ellas con el procedimiento de medida implementado en este trabajo. Este análisis comparativo nos permitirá comprobar la posible mejora de ancho de banda ofrecido por la estructura multi-núcleo con respecto a la POF estándar.



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).

D./D^a. Sergio Ramón Tarancón,

con nº de DNI 17457332-X 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)

Medida de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de plástico de múltiples
núcleos mediante un analizador de redes vectorial.

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

Zaragoza, 26 de junio de 2015

Fdo: Sergio Ramón Tarancón

Índice de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Contexto y motivación.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Organización de la memoria.....	3
2.	La fibra óptica de plástico (POF)	5
2.1.	Características generales de las POF.....	5
2.2.	Fibras SC-POF y MC-POF	8
3.	Sistema de medidas con analizador de redes vectorial	10
3.1.	Antecedentes y estado de la técnica	10
3.1.1.	Barrido de frecuencias mediante tonos puros.....	11
3.1.2.	Medida de ancho de banda utilizando un tren de pulsos	12
3.2.	Elementos físicos	12
3.2.1.	El Analizador de Redes Vectorial.....	13
3.2.2.	El emisor	15
3.2.3.	El detector.....	17
3.2.4.	El amplificador.....	18
3.3.	Sistema de medida del ancho de banda	20
3.3.1.	Descripción del sistema	20
3.3.2.	Procedimiento de medida.....	24
3.4.	Sistema software.....	24
3.4.1.	Interfaz Gráfico.....	25
3.4.2.	Sistema de control y funciones del interfaz gráfico.....	26
3.4.3.	Tratamiento y clasificación de las señales.	29
3.4.4.	Post-procesado de las señales obtenidas.	29
4.	Resultados.....	32
4.1.	Validación del sistema con SC-POF	32
4.2.	Caracterización frecuencial MC-POF	35
4.2.1.	Estudios previos.....	35
4.2.2.	Ancho de banda en función de la longitud.....	38
5.	Conclusiones y líneas futuras.....	44
5.1.	Conclusiones	44
5.2.	Líneas futuras.....	45
5.3.	Valoración del proyecto	46
6.	Referencias	47

Anexo I – Hojas de características	50
Anexo II – Estructuras de datos.....	69
Anexo III – Tasas de transmisión	74
Anexo IV – Diagrama de Gantt	76

Índice de Figuras

Figura 2.1: Estructura de una fibra óptica -----	6
Figura 2.2: Atenuación espectral de una PMMA-POF (Medidas realizadas por D. Hess [14])-----	6
Figura 2.3: Clasificación de las POFs en función del perfil de índice. (a) Salto de índice (<i>Step-Index</i>), (b) Índice Gradual (<i>Graded-Index</i>), (c) Salto de índice escalonado (<i>Multi-Step Index</i>), (d) Multi-Núcleo (<i>Multi-Core</i>).-----	7
Figura 2.4: Pérdidas en función del radio de curvatura. Comparativa entre una MC-POF Luminous y una SC-POF convencional [21].-----	8
Figura 2.5: Esquema de multiplexación por división espacial (SDM) en una MC-POF. -----	9
Figura 2.6: Posibles modelos geométricos para la ordenación de los núcleos en una MC-POF -----	9
Figura 2.7: Estructura de una MC-POF de 37 núcleos. Los núcleos están deformados debido al proceso de fabricación.-----	9
Figura 3.1: Esquemático del sistema experimental propuesto en [6] con dispositivos de propósito general para caracterizar en ancho de banda en POFs. -----	12
Figura 3.2: Representación esquemática de un bipuerto donde se especifican las ondas de potencia (a_i , b_i), las impedancias características y los parámetros de reflexión.-----	13
Figura 3.3: Curva característica potencia-corriente de un diodo láser junto con la señal de modulación RF y la señal de potencia óptica.-----	16
Figura 3.4: Curva característica potencia-corriente del diodo láser DL3147-060. -----	16
Figura 3.5: Módulo del parámetro S_{11} de la base LDM9T y el láser DL3147-060. -----	17
Figura 3.6: Curvas de ganancia del amplificador ZKL-1R5+ -----	19
Figura 3.7: Curvas de ganancia del amplificador ZKL-2R5+ -----	19
Figura 3.8: Esquemático con los elementos que conforman el sistema de medida del ancho de banda haciendo uso de un Analizador de Redes Vectorial. -----	21
Figura 3.9: Esquema del sistema de medida con los cambios de plano después de la calibración. -----	22
Figura 3.10: Interfaz gráfico de usuario desarrollada en MatLab para manejar el VNA y almacenar los datos.25	
Figura 3.11: Esquema de funcionamiento del sistema de control e interfaz gráfica para el control del VNA desde un ordenador con el entorno de MatLab.-----	28
Figura 3.12: Comparación de la frecuencia de las oscilaciones interferentes para dos longitudes de fibra SMCK. -----	30
Figura 3.13: Ejemplo de corrección del parámetro $ S_{21} $ mediante el filtrado de media móvil.-----	30
Figura 3.14: Esquema de funcionamiento del algoritmo encargado de <i>Post-Procesar</i> la información obtenida del VNA.-----	31
Figura 4.1: Comparación de anchos de banda para una SC-POF de la marca HP con el sistema de barrido frecuencial con dispositivos de propósito general [23] y el sistema presentado en este trabajo con VNA. ----	32
Figura 4.2: Comparación de anchos de banda para una SC-POF de la marca ESKA con el sistema de barrido frecuencial con dispositivos de propósito general [23] y el sistema presentado en este trabajo con VNA. ----	33
Figura 4.3: Comparación de anchos de banda para una SC-POF de la marca BOEING con un Analizador de Redes Escalar [25] y el sistema presentado en este trabajo con VNA.-----	34
Figura 4.4: Esquema del efecto de filtrado espacial que se produce en el detector. a) El área que ilumina la fibra queda contenida en el detector, b) El área que ilumina la fibra ilumina un área mayor que el detector, c) La distancia a la que se encuentra la fibra hace que el área que ilumina la fibra sea mayor que el detector.----	35

Figura 4.5: Distribución de potencia de campo cercano para una MC-POF de 19 núcleos. a) Inyección directa con un láser altamente elíptico, b) Inyección uniforme con un tramo corto de SC-POF. -----	36
Figura 4.6: Distribuciones de potencia de campo lejano para una MC-POF de 19 núcleos. a) Inyección directa con láser altamente elíptico, b) Inyección uniforme mediante un tramo corto de SC-POF.-----	36
Figura 4.7: Desalineamiento longitudinal entre una SC-POF como inyectora y una MC-POF de 25m. a) Ancho de banda, b) atenuación en la potencia óptica recibida al final de la MC-POF.-----	37
Figura 4.8: Desalineamiento transversal entre una SC-POF como inyectora y una MC-POF de 25m. a) Ancho de banda, b) atenuación en la potencia óptica recibida al final de la MC-POF.-----	37
Figura 4.9: Configuraciones de conexión de la MC-POF en el sistema de medida. arriba) configuraciones 1 y 2 con conexión directa al emisor/detector; centro) configuraciones 3 y 4 con tramo corto de SC-POF en la inyección; abajo) configuraciones 5 y 6 con tramo corto de SC-POF en la detección. -----	39
Figura 4.10: Resultados de ancho de banda para la MC-POF SMCK-1000, con las 6 configuraciones propuestas. -----	39
Figura 4.11: Ancho de banda de la fibra SMCK-1000 para las configuraciones 1, 3 y 5.-----	40
Figura 4.12: Ancho de banda de la fibra SMCK-1000 para las configuraciones 2, 4 y 6. -----	41
Figura 4.13: Variabilidad entre la configuración 1 y 2 (conexión directa) del ancho de banda y de la atenuación de la fibra. -----	41
Figura 4.14: Variabilidad entre la configuración 3 y 4 (SC-POF en inyección) del ancho de banda y de la atenuación de la fibra. -----	42
Figura 4.15: Variabilidad entre la configuración 5 y 6 (SC-POF en detección) del ancho de banda y de la atenuación de la fibra. -----	42
Figura 4.16: Comparación de ancho de banda de la MC-POF SMCK-1000 y varias SC-POF. Todas las medidas han sido realizadas con el sistema presentado en este trabajo (VNA). -----	43
Figura AII.1: Estructura de MatLab con los parámetros básicos para una medida de POF de 25m por los dos lados. -----	70
Figura AII.2: Módulo del parámetro S_{21} para una fibra de 25m obtenida directamente del VNA y post-procesada. -----	71
Figura AII.3: Respuesta frecuencial de una fibra de 25m después de restar la referencia.-----	71
Figura AII.4: Retardo de grupo para una fibra de 25m. -----	72
Figura AII.5: Fase desenrollada para una fibra de 25m. -----	72
Figura AII.6: Patrón de campo lejano para una fibra SMCK-1000 de 25m con inyección directa y con tramo corto de SC-POF -----	73
Figura AII.7: Imágenes del patrón de campo lejano para una fibra SMCK-1000 de 25m con diferentes condiciones de inyección. -----	73
Figura AIII.1: BER frente a tasa de transmisión para una fibra SMCK de 50m -----	74
Figura AIII.2: Diagrama de ojo para una tasa de transmisión de 400 Mb/s en una fibra SMCK de 50 m. ----	74
Figura AIII.3: Diagrama de ojo para una tasa de transmisión de 700Mb/s en una fibra SMCK de 50 m. ----	75
Figura AIII.4: Diagrama de ojo para una tasa de transmisión de 1 Gb/s en una fibra SMCK de 50 m. -----	75
Figura AIV.1: Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto. -----	76

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Características principales de diodo láser DL3147-060.	16
Tabla 3.2: Características principales del detector DET10A/M.	18
Tabla 3.3: Características principales del amplificador ZKL-1R5+	19
Tabla 3.4: Características principales del amplificador ZKL-2R5+	19

1. Introducción

Según la teoría de la comunicación, todo sistema que sirva para enviar y recibir información ha de disponer de una canal de comunicaciones. En telecomunicaciones existen diferentes canales, guiados y no guiados. Todos ellos comparten un parámetro fundamental que ha de ser caracterizado con precisión para aprovechar al máximo los recursos que el canal ofrece, es el ancho de banda.

Dentro de los medios guiados se encuentran las fibras ópticas que tradicionalmente se han aplicado en enlaces de largo alcance y gran ancho de banda. Actualmente existen distintos tipos de fibras que varían en función de sus características físicas, siendo una de las más relevantes el material del que se componen. Dos de los tipos más extendidos son la fibra óptica de vidrio (GOF, *Glass Optical Fiber*) y la fibra óptica de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*).

Las fibras ópticas de vidrio debido a su aparición mucho más temprana para comunicaciones ópticas que las de plástico o polímero, han sido ampliamente estudiadas y caracterizadas. Presentan un gran ancho de banda, lo que ha hecho posible disponer de enlaces basados en GOF trabajando a altas tasas de transmisión y operando lejos de su límite de capacidad. Por lo tanto la caracterización precisa del ancho de banda en estas no supone actualmente un problema trascendental.

Sin embargo las fibras ópticas de plástico poseen unas propiedades físicas muy diferentes, lo que hace que la propagación de la luz a su través no pueda ser descrita de forma analítica. Por este motivo, es necesario caracterizar los parámetros de transmisión de este tipo de fibras, entre los que destaca su ancho de banda, usando técnicas experimentales. Además, las POF presentan peores características de propagación que las fibras de vidrio, de forma que se han ido sucediendo modificaciones sobre su geometría y materiales con el objetivo de mejorar sus prestaciones y hacerla más competitiva. Dentro de estas variantes de fibra de plástico y aprovechando las características de los polímeros, se han fabricado POFs que integran múltiples núcleos en una misma fibra y que presumiblemente mejoran el ancho de banda y la tolerancia a curvaturas. A estas fibras se les conoce como fibras ópticas de plástico multi-núcleo, (MC-POF) y constituyen el eje central del trabajo fin de grado realizado.

1.1. Contexto y motivación

El trabajo descrito en esta memoria se enmarca en la línea de investigación de fibras ópticas de plástico y aplicaciones desarrollada en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones de la EINA cuya actividad abarca desde el modelado de la fibra y dispositivos [1], [2] hasta la aplicación en redes de corto alcance [3] pasando por el diseño y desarrollo de sistemas experimentales para la caracterización de parámetros importantes en la transmisión [4]–[6].

Hasta el momento, el grupo se ha centrado en fibras de plástico de salto de índice fabricadas en polimetilmetacrilato (PMMA SI-POF) y con un único núcleo de 1 mm de diámetro. Para este tipo de fibras se ha desarrollado un modelo matricial que describe la propagación de la luz y que se está actualmente integrando en *software* comercial para poder simular entornos complejos [7]. Los parámetros característicos de estas fibras se obtienen a partir de datos experimentales y sus predicciones ya se han contrastado con medidas de parámetros de transmisión como por ejemplo el ancho de banda de la fibra [8]. En el laboratorio de POF se han desarrollado varios sistemas de

medida de este parámetro basados en equipos de uso general con el que se han caracterizado fibras de un sólo núcleo de distintos fabricantes [4], [6]

Actualmente, el grupo de POF está colaborando en un proyecto con investigadores del *College of Staten Island* que es una de las sedes del CUNY (*City University of New York*) para la implantación dentro de aviones de redes de datos basadas en POFs [9]. Dentro de esta colaboración, la compañía Boeing, en contacto con los investigadores de CUNY, ha mostrado su interés en el estudio de las fibras de plástico de varios núcleos debido a que presentan la posibilidad de transmitir mayor cantidad de información sin perder las ventajas de las fibras de plástico de un sólo núcleo.

1.2. Objetivos

Uno de los parámetros más importantes en la aplicación de las fibras ópticas en comunicaciones es su capacidad para transmitir información, cuantificada por el ancho de banda que se puede extraer de la función respuesta en frecuencia característica de la fibra.

El objetivo fundamental de este proyecto es el **diseño de un sistema de medida de la respuesta frecuencial de fibras ópticas de plástico**, basado en un analizador vectorial de redes. El sistema debe de ser flexible de forma que permita caracterizar tanto fibras cortas, que presentan grandes valores de ancho de banda, como muy largas donde las limitaciones vienen impuestas por la baja potencia de luz debida a la atenuación. El control del sistema deberá de realizarse de forma automatizada mediante programas de uso simple de forma que pueda ser utilizado por usuarios no expertos en el equipamiento subyacente. Además deberá integrar los procesos de obtención de medidas, así como el de clasificación de datos y su posterior procesado. Para validar el sistema, se realizarán estudios comparativos con otros sistemas previamente desarrollados dentro del grupo, enfocados a caracterizar el ancho de banda en fibras ópticas de plástico de un solo núcleo (SC-POF).

Así mismo, y una vez validado el sistema, se realizará la **caracterización del ancho de banda de fibras de plástico multi-núcleo (MC-POF)** y se explorará su dependencia con las condiciones de medida y la longitud de fibra. Debido a la falta de literatura sobre las MC-POF, se desconoce cuáles son los efectos que se producen en la transmisión de la luz y la interacción entre los múltiples núcleos. Por lo tanto se someterá la fibra a diferentes pruebas, analizando la variación del ancho de banda. Las medidas de ancho de banda en MC-POF se compararán con los valores obtenidos para SC-POF lo que permitirá cuantificar las ventajas de transmisión debidas a la presencia de múltiples núcleos.

Los resultados obtenidos en este trabajo serán de gran utilidad para el grupo de investigación en POF. Por una parte, el establecimiento del procedimiento de medida, la realización del montaje experimental y el software de comunicación con el VNA para la obtención de datos pasarán a formar parte de las herramientas de caracterización de POF del grupo. Por otra parte, los resultados de ancho de banda en MC-POF permitirán ahondar en el conocimiento de este tipo de fibra, sobre la que actualmente se está investigando con el objetivo de conseguir un modelado teórico del mismo.

1.3. Organización de la memoria

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

- Capítulo 1: Introducción

Se plantea el interés general del proyecto y el grupo de trabajo en el que se enmarca el mismo. También se detallan los objetivos y se hace una descripción del contenido de cada capítulo de la memoria.

- Capítulo 2: La fibra óptica de plástico (POF)

En el segundo capítulo se profundiza en las fibras ópticas de plástico y sus características generales. Se detallan algunas diferencias con respecto a las fibras ópticas de vidrio y se analizan las ventajas y desventajas de la fibra de plástico frente a la de vidrio. Además se diferencia entre dos tipos de fibra óptica de plástico, las de un solo núcleo y las de múltiples núcleos, siendo estas últimas el principal objeto de estudio de este proyecto.

- Capítulo 3: Sistema de medidas con analizador de redes vectorial

El tercer capítulo se centra en los sistemas de medida de ancho de banda de fibra óptica de plástico. En primer lugar se realiza un repaso de los sistemas de medida que han sido utilizados hasta la fecha para caracterizar las fibras ópticas de plástico. Posteriormente se describen y analizan los dispositivos que serán utilizados en el sistema experimental propuesto en este trabajo. Con los dispositivos caracterizados se procede a describir el sistema de medida de ancho de banda con un analizador de redes vectorial y se especifica el procedimiento a seguir para medir el ancho de banda. Finalmente se enumeran y explican las funcionalidades del *software* desarrollado específicamente para este sistema de medida.

- Capítulo 4: Resultados

Este capítulo contiene los resultados de todos los experimentos realizados con el sistema y la caracterización de las fibras ópticas de plástico de múltiples núcleos.

En primer lugar se valida el sistema comparando los resultados con anteriores proyectos que caracterizaban fibras ópticas de plástico de un solo núcleo. Tras el análisis de los resultados se procede a caracterizar el ancho de banda de las fibras ópticas de múltiples núcleos para un rango de longitudes determinado. Debido a las características especiales de estas fibras se realizan estudios previos que permiten relacionar los resultados con las propiedades físicas de este tipo de fibra.

Finalmente se realiza una comparación de todos los resultados obtenidos con la intención de comparar los anchos de banda para fibras ópticas de plástico de un solo núcleo o múltiples núcleos.

- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

Se realiza una síntesis del trabajo realizado, se extraen conclusiones del mismo y se plantean posibles líneas de trabajo para el futuro, relacionadas este trabajo.

- Anexo I:—Hojas de características

En este anexo se incluyen todas las hojas de características completas de los dispositivos y elementos utilizados en el trabajo.

- Anexo II: – Estructuras de datos

Este anexo incluye una muestra de los datos primarios obtenidos del sistema de medida y el proceso de procesamiento hasta la obtención del ancho de banda. Además se incluyen otras posibles utilidades de la información extraída del analizador de redes vectorial que a priori no es utilizada.

- Anexo III: – Tasas de transmisión

Este anexo incluye un análisis de prestaciones en la tasa de transmisión de una MC-POF así como diagramas de ojo.

- Anexo IV: Diagrama de Gantt

Este anexo contiene un diagrama de Gantt que muestra la evolución del proyecto.

2. La fibra óptica de plástico (POF)

La aparición de la fibra óptica tuvo lugar a mediados del siglo XX cuando K. C. Kao y G. A. Hockman propusieron un sistema de guiado de luz basado en un material dieléctrico recubierto con otro material de un índice de refracción menor [10]. Además estos medios de transmisión solo serían viables si se conseguían atenuaciones por debajo de los 20 dB/km ya que muchos sistemas eléctricos ofrecían estas atenuaciones. A partir de ese momento la evolución en los procesos de fabricación y los continuos estudios sobre los efectos que generaba la fibra óptica permitió desarrollar una gran variedad de estas con distintas propiedades y características, abriéndose paso en la rama de las telecomunicaciones.

En los años 60, el material utilizado para fabricar las fibras ópticas había sido el SiO_2 , sin embargo con la idea de abaratar costes se realizaron pruebas con otros materiales como el PMMA (polimetilmetacrilato). Esta fue la aparición de las fibras de plástico, las de un único núcleo y salto de índice (SI-POF), las cuales no tuvieron mucho éxito debido a la gran atenuación que presentaban. En el año 1990, el desarrollo de las POF de índice gradual, por el profesor Koike [11], [12], de la Universidad de Keio y el posterior desarrollo de las fibras perfluorinadas impulsó la utilización de estas para aplicaciones en ciertos entornos más reducidos, como vehículos y hogares.

La principal diferencia de las POF frente a las fibras de vidrio (GOF) radica en su diámetro y en su estructura, lo que le confiere ciertas ventajas e inconvenientes. Por una parte, su manipulación y conectorización es más sencilla debido a su alta apertura numérica (NA). Sin embargo, este hecho también será responsable de las peores características de transmisión (atenuación y ancho de banda) ofrecido por las POF. Intentando mejorar las prestaciones de éstas, a lo largo de los últimos años se han creado variantes de la fibra POF estándar en las que se varía el perfil de índice, el material con el que se fabrican las fibras o el número de núcleos, con el objetivo de alcanzar mayor resistencia a las curvaturas y tasas de transmisión más elevadas.

2.1. Características generales de las POF

Al igual que las fibras ópticas de vidrio, las POF son guías de ondas de geometría cilíndrica, flexibles y transparentes. La sección transversal es circular y está formada por diferentes estructuras que dan lugar a fibras de diferentes características. La Figura 2.1 muestra esquemáticamente la geometría de una fibra óptica. Generalmente se distinguen tres capas:

La capa más interna es el **núcleo** y por ella viaja la señal luminosa. Las características del núcleo pueden ser diferentes. Las más simples tienen un índice de refracción uniforme (perfil de salto de índice, SI). Otras tienen un índice de refracción que varía con el radio (perfil de gradiente de índice, GI). El tamaño del núcleo suele medir entre $980\text{ }\mu\text{m}$ y 1 mm [13], que comparado con el de una fibra de vidrio, es mucho mayor ($3\text{ y }25\text{ }\mu\text{m}$). El tamaño del núcleo dota a esta fibra de un fácil manejo y conexión. Esto se traduce en una apertura numérica mayor, $NA_{POF} \approx 0.5$ frente a $NA_{GOF} \approx 0.17$ [13]. Por lo tanto obtenemos una mejor manejabilidad e inyecciones de luz con sistemas menos precisos.

La capa intermedia es la **cubierta o cladding** y junto con el núcleo hacen posible el guiado de la luz mediante el fenómeno de reflexión total en el interfaz. El índice de esta capa es menor que el del núcleo y suele ser de índice de refracción uniforme.

La capa más externa conocida como **revestimiento o jacket** es la encargada de ofrecer a las fibras resistencia y flexibilidad, además la protege frente a agentes externos.

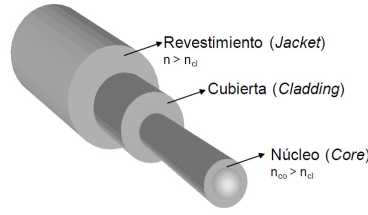


Figura 2.1: Estructura de una fibra óptica

El espectro de atenuación de la POF presenta los valores más bajos en el rango del visible. Por lo tanto se trabajará con dispositivos cuya longitud de onda de operación se encuentre en ese rango. En la Figura 2.2 se representa la curva de atenuación de una PMMA-POF caracterizada según el método propuesto por D. Hess [14].

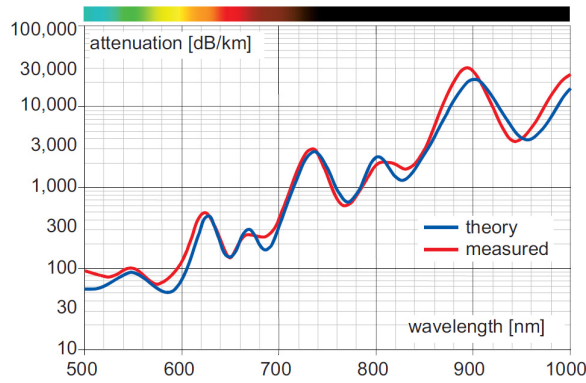


Figura 2.2: Atenuación espectral de una PMMA-POF (Medidas realizadas por D. Hess [14])

Por otra parte las POF presentan mayor resistencia a las curvaturas facilitando su uso en entornos con geometrías complicadas [15]. Esto es debido principalmente a su mayor tamaño, que hace que las pérdidas por curvaturas sean menores, además de que el material del que están construidas (polímero) les confiere mayor flexibilidad frente al vidrio.

Como en toda guía de ondas, dependiendo de la geometría, de la constante dieléctrica de los materiales y de la constante de propagación, se puede definir una frontera, para la cual la guía de ondas solo permitirá propagar un modo o varios; en tal caso hablaremos de fibras mono-modo y multi-modo, respectivamente.

En las fibras ópticas esta frontera la marca la frecuencia de corte normalizada V que se define según la Ecuación (2.1):

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

donde ρ es el radio del núcleo, λ la longitud de onda de la señal luminosa, n_{co} el índice de refracción del núcleo, n_{cl} el índice de refracción de la cubierta. Cuando el valor de V es menor de 2.405, la fibra sólo propaga el modo fundamental híbrido HE_{11} o también conocido como modo LP_{01} . Estos modos aparecen de resolver las ecuaciones de Maxwell y aplicar las condiciones de frontera, cuyas únicas soluciones posibles son valores discretos. El valor de V resulta ser la frecuencia de corte normalizada para la que aparecería el siguiente modo, LP_{11} . Corresponde con el valor del primer cero de la función de Bessel de 1ª especie [16].

Una aproximación del número de modos para fibras de salto de índice es la siguiente [17]:

$$N \approx \frac{V^2}{2} \text{ si } V \gg 1 \quad (2.2)$$

La geometría de la POF, los materiales que la forman y la longitud de onda que se utiliza hace que la frecuencia de corte normalizada (V) sea muy grande y por lo tanto que estas fibras pertenezcan al grupo de las fibras multi-modo. El número de modos de propagación es muy elevado en torno a 10^4 y 10^9 para $\lambda = 650$ nm [18], de forma que se puede afirmar que las fibras ópticas de plástico son altamente multimodales. Este hecho hace necesario que para caracterizar este tipo de fibras haya que considerar las características espaciales de la luz que las atraviesa. Así, al propagarse la luz por la POF, la distribución angular de potencia óptica se ve afectada por varios fenómenos que afectan de forma diferente a los distintos modos y que modifican las propiedades de propagación de la fibra, entre las que destaca el ancho de banda.

El principal fenómeno que limita el ancho de banda y por tanto la máxima velocidad de transmisión viable es la dispersión modal que se produce por la diferencia de tiempos de propagación entre los distintos modos que se propagan por la fibra.

Al igual que sucedió con la fibra óptica de vidrio, las primeras POF fueron de salto de índice y posteriormente han evolucionado a estructuras más complejas. Las fibras ópticas de plástico se pueden agrupar en dos tipos principales de fibras, las fibras de plástico mono-núcleo (SC-POF) y las multi-núcleo (MC-POF). En la Figura 2.3 se muestra un esquema de los perfiles de índice más comúnmente encontrados en fibras de plástico. Se asume que todas ellas tienen el mismo diámetro, pero puede ser diferente.

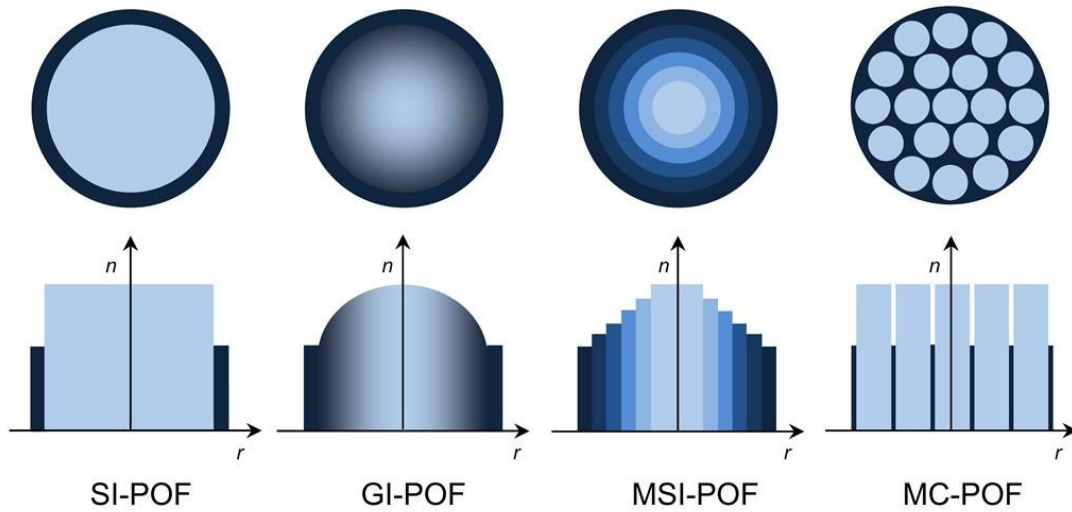


Figura 2.3: Clasificación de las POFs en función del perfil de índice. (a) Salto de índice (*Step-Index*), (b) Índice Gradual (*Graded-Index*), (c) Salto de índice escalonado (*Multi-Step Index*), (d) Multi-Núcleo (*Multi-Core*).

Las SC-POF constituyen el grupo más numeroso de fibras de plástico y agrupan diversas variantes en cuanto a perfil de índice (SI-POF, GI-POF, MSI-POF, entre otras) y en cuanto a materiales (básicamente PMMA-POF y PF-POF) [19].

Las SI-POF fueron las primeras fibras ópticas de PMMA que se empezaron a fabricar. Su principal característica es el cambio abrupto del índice de refracción entre el núcleo y la cubierta. El diámetro estándar del núcleo de estas fibras es de 1 mm. Este tipo de fibra presenta una fuerte dispersión modal. Por otra parte, las GI-POF se caracterizan por tener un núcleo cuyo índice de refracción varía con el radio. Estas características permiten reducir la dispersión modal y

proporcionar mayores anchos de banda. En cuanto a las fibras de multi-salto de índice (MSI-POF), también se caracterizan por tener un núcleo con variaciones en el índice de refracción. En este caso el núcleo está compuesto de capas cuyos materiales presentan índices de refracción diferentes y uniformes. La principal ventaja de estas fibras, es la sencillez de fabricación con respecto a las GI-POF y la disminución de la dispersión modal [20].

Por otra parte las MC-POF, son unas fibras más recientes que integran en la misma estructura varios núcleos siendo el diámetro total de la estructura equivalente al de una fibra de un único núcleo. A continuación, se describen en más detalle las fibras de plástico SC-POF y MC-POF.

2.2. Fibras SC-POF y MC-POF

A pesar de las desventajas en términos de dispersión modal, la SC-POF de 1 mm de diámetro es la fibra de plástico más utilizada hasta el momento porque reduce el coste gracias a la madurez de su proceso de fabricación y la simplificación de los procesos de instalación y mantenimiento.

Otra estructura propuesta para las POF con la intención de mejorar sus prestaciones, aumentando la resistencia a las curvaturas, es introducir varios núcleos en una misma fibra compartiendo la misma cubierta. Esta estructura tiene además la ventaja añadida de permitir aplicar la técnica de multiplexación espacial en las comunicaciones mediante POF. Surge así la fibra óptica de plástico de varios núcleos (MC-POF). El número de núcleos cambia en función del fabricante y modelo, variando entre los 19 y 200 núcleos.

Las principales ventajas con respecto a las SC-POF son:

- Bajas pérdidas frente a curvaturas: Las pérdidas frente a curvaturas dependen aproximadamente del cociente entre el radio de la curvatura y el radio del núcleo [15]. Si este cociente es grande las pérdidas por curvaturas serán menores. Como el radio del núcleo es menor (ya que están contenidos varios núcleos en el mismo diámetro), son mejores frente a las SC-POF. En la Figura 2.4 se muestra una comparativa de atenuación frente a curvaturas entre una SC-POF y una MC-POF, siendo esta última inmune incluso a curvaturas de 10 mm.

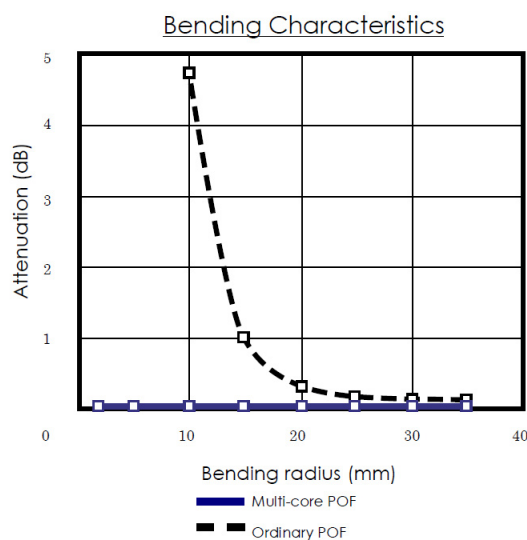


Figura 2.4: Pérdidas en función del radio de curvatura. Comparativa entre una MC-POF Luminous y una SC-POF convencional [21].

- Mejora del ancho de banda con respecto a las SC-POF [13], [20].

- Capacidad para realizar multiplexación por división espacial (SDM), ya que la estructura de la fibra, con varios núcleos, hace posible crear un canal de comunicación por cada uno de ellos [20], [22]. En la Figura 2.5 se puede observar un esquema de SDM en una fibra MC-POF de 7 núcleos.

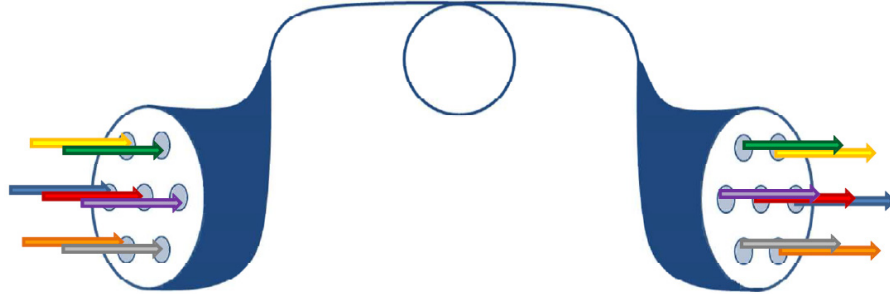


Figura 2.5: Esquema de multiplexación por división espacial (SDM) en una MC-POF.

Existen en el mercado distintos tipos de MC-POF que se diferencian principalmente en el número de núcleos que contienen. En la Figura 2.6 se muestran varias estructuras teóricas de la ordenación de los núcleos en una MC-POF.

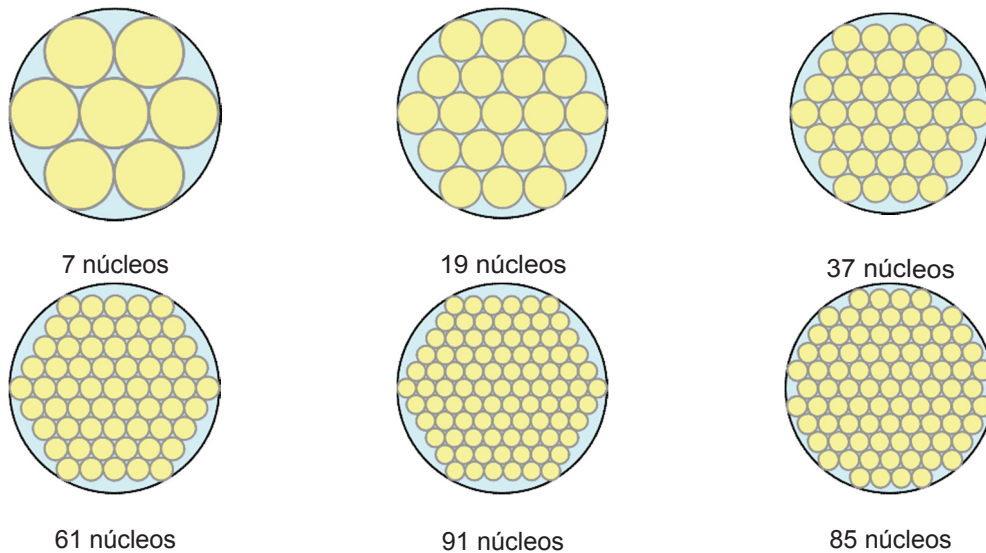


Figura 2.6: Posibles modelos geométricos para la ordenación de los núcleos en una MC-POF

Las estructuras anteriores son ideales, sin embargo los procesos de fabricación no son tan precisos y las estructuras que se consiguen son más similares a las de la Figura 2.7.

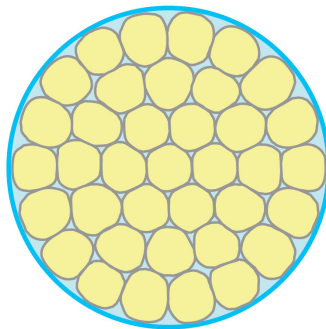


Figura 2.7: Estructura de una MC-POF de 37 núcleos. Los núcleos están deformados debido al proceso de fabricación.

3. Sistema de medidas con analizador de redes vectorial

En este capítulo se describe detalladamente el sistema que se ha implementado para la caracterización de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de plástico de forma automatizada.

La idea de utilizar este sistema de medida surgió de otros proyectos anteriormente realizados en la Universidad de Zaragoza, que utilizaban métodos similares, con instrumentos de medida diferentes [23]–[25].

La evolución de la técnica comenzó con la utilización de un osciloscopio como instrumento para hacer individualmente las medidas, continuó con un analizador de redes escalar y finalmente en este trabajo se utilizará un analizador de redes vectorial. Con este instrumento de medida, se integra el equipo sintetizador de señales y el equipo de representación y análisis. Por lo tanto es posible obtener las medidas en un tiempo muy pequeño comparado con los sistemas anteriores. Por otra parte el VNA proporciona mucha más información que el analizador de redes escalar, que es necesario almacenar y procesar.

3.1. Antecedentes y estado de la técnica

Debido a los problemas que supone la caracterización de las fibras de plástico, durante los últimos años han aparecido sistemas de medida experimentales, más o menos complejos, que permitieran caracterizarlas obteniendo resultados fieles a la realidad.

Estos sistemas han evolucionado a partir de los sistemas de medida utilizados para caracterizar fibras ópticas de vidrio, adaptándose a las nuevas peculiaridades de las POF y resolviendo problemas tales como la dependencia de los resultados en función de la distribución modal y la fuerte atenuación experimentada por la luz en estas fibras. Estos sistemas se pueden adaptar tanto a las fibras de salto de índice como a las fibras de índice gradual.

Existen dos métodos estandarizados y universalmente aceptados para medir el ancho de banda en fibras ópticas multi-modo. Estos dos métodos están recogidos en la norma japonesa **JIS C 6824** [26] editada por el JIS (*Japanese Industrial Standard*) y se denominan método de pulsos y método de barrido frecuencial, respectivamente.

El objetivo final de ambos métodos es la obtención de la respuesta frecuencial equivalente del sistema sometido a medida. Este aspecto tiene especial relevancia, ya que el propósito es obtener el ancho de banda de la fibra, sin embargo en la medida intervienen otros elementos electrónicos (emisor, detector, amplificador...). Por lo tanto para obtener la respuesta frecuencial únicamente de la fibra, será necesario descontar las contribuciones de cada elemento.

A continuación se describen dos técnicas experimentales para la caracterización del ancho de banda en POFs que han sido probadas por el grupo en el que se ha desarrollado este TFG y que se basan en los métodos estandarizados por el JIS [6], [26], [27].

3.1.1. Barrido de frecuencias mediante tonos puros.

La norma JIS no especifica completamente el equipamiento a utilizar en este método, por lo que en el grupo de trabajo se ha implementado utilizando equipos de propósito general tales como un generador de señales, un osciloscopio y fuentes de alimentación [23].

El método consiste en generar tonos puros para hacer un barrido de frecuencias y modular un diodo laser previamente polarizado en zona de emisión estimulada. Estos tonos son transmitidos por la fibra de plástico que se desea caracterizar y recibidos en un fotodiodo. La señal que se genera en el detector es amplificada por un amplificador de RF e introducida al osciloscopio.

Como todo sistema tiene ciertas limitaciones impuestas por los dispositivos que se utilizan. Para realizar una medida correcta es necesario asegurar que los dispositivos utilizados van a poder soportar las frecuencias de los tonos puros a los que se van a someter. Además como se ha comentado anteriormente las POF tienen grandes atenuaciones y esto genera dificultades para medir con precisión las altas frecuencias o las largas distancias.

En la implementación realizada por el grupo, la señal representada en el osciloscopio es capturada (o adquirida) para posteriormente realizar un procesamiento de señal que permita obtener la respuesta frecuencial en cada una de las frecuencias consideradas con la menor cantidad de ruido posible. Con este propósito, se realiza una transformada de Fourier y se mide únicamente la amplitud en la frecuencia específica. Además, para evitar los efectos derivados de la observación finita en el tiempo y el número de muestras limitado, se utiliza una ventana de Hanning. Además, se realiza una estimación de la relación señal a ruido (SNR), de forma que cuando estamos por debajo de un umbral se activa un promediado automático. De esta manera se pretende obtener una medida realizada frente al ruido.

Por otra parte este sistema tiene un aspecto fundamental que hay que considerar; el efecto de los sistemas electrónicos frente al producido por la POF. Para desacoplar este efecto de las medidas obtenidas se propone utilizar una referencia que sólo incluya los efectos de estos dispositivos. La referencia se puede obtener realizando este mismo barrido de frecuencias con una POF corta que debido a su pequeña longitud se puede considerar como transparente para el sistema. Posteriormente las medidas obtenidas con la POF largas serán divididas (en amplitud) con la referencia. De esta manera se eliminan todas las respuestas frecuenciales de los elementos electrónicos.

La Figura 3.1 muestra el esquema de la técnica de barrido de frecuencias mediante tonos puros basada en equipos de propósito general.

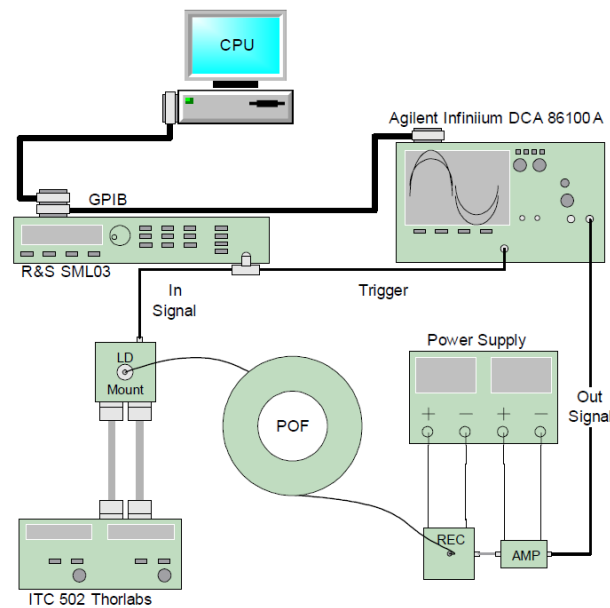


Figura 3.1: Esquemático del sistema experimental propuesto en [6] con dispositivos de propósito general para caracterizar en ancho de banda en POFs.

3.1.2. Medida de ancho de banda utilizando un tren de pulsos

Este método introduce una variación fundamental en el procedimiento de medida con respecto al anterior [23], [27]. Este método se lleva a cabo en el dominio del tiempo, sin embargo el montaje del sistema para llevarlo a cabo es el mismo que en el anterior sistema de medida, que se muestra en la Figura 3.1.

Idealmente una manera precisa de obtener la respuesta frecuencial del sistema es obtener la respuesta al impulso y transformar dicha respuesta al dominio frecuencial. Sin embargo al tratarse de un sistema sencillo, se entiende que no se dispone de instrumentación de medida, como por ejemplo un generador de pulsos temporales muy estrechos. Por ello se plantea una solución alternativa, que propone el uso de pulsos anchos en vez de pulsos muy estrechos.

El fundamento teórico se basa en estimar la respuesta al escalón en la salida del sistema, introduciendo un tren de pulsos amplios en el emisor. Teóricamente la derivada de una función escalón es una función delta, por lo tanto la respuesta impulsional del sistema se podrá obtener como la derivada de la respuesta obtenida a la salida del sistema. Si hacemos la transformada de Fourier de la derivada de la señal obtenida a la salida del sistema, obtendremos la respuesta frecuencial del sistema.

Este método también ha sido implementado experimentalmente en el laboratorio de POF dando resultados similares al anterior [23].

3.2. Elementos físicos

El montaje experimental realizado en este trabajo para implementar el método de barrido frecuencial varía alguno de los elementos que se nombran en el estándar. Sin embargo el montaje es similar y los nuevos elementos integran las funciones de varios dispositivos.

3.2.1. El Analizador de Redes Vectorial

El analizador de redes vectorial (VNA) es un dispositivo sofisticado utilizado para caracterizar dispositivos de varias puertas como amplificadores, filtros, antenas o redes más sofisticadas. Los analizadores de redes vectoriales suelen medir los parámetros de dispersión o parámetros S, que relacionan las potencias incidentes y reflejadas en los puertos y son medibles a altas frecuencias.

El VNA incluye internamente un sintetizador de señales por lo que nos permitirá implementar el método de barrido de frecuencias de forma directa sin requerir un elemento de sincronización entre sintetizador y analizador. Además, el VNA tiene la ventaja con respecto a los analizadores de redes escalares, de medir la fase instantánea de la señal por lo que se puede obtener mucha más información.

Los parámetros S sirven para caracterizar la reflexión y la transmisión que tiene lugar en el dispositivo que se desea medir (DUT, *Device Under Test*). Para entender el funcionamiento y las medidas que se obtienen con este dispositivo es necesario definir dichos parámetros.

Conceptos teóricos

En una red de 2 puertas se definen los parámetros S como:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

donde a_1 es la onda de potencia incidente por la puerta 1, a_2 es la onda de potencia incidente por la puerta 2, b_1 es la onda de potencia reflejada en la puerta 1 y b_2 es la onda de potencia reflejada en la puerta 2, tal y como se indica en la Figura 3.2.

Las ondas de potencia u ondas de voltaje normalizadas se definen para una red de n puertos como:

Onda de voltaje incidente normalizada:

$$a_n = \frac{V_n + I_n Z_{0n}}{2\sqrt{|\Re\{Z_{0n}\}|}} \quad (3.2)$$

Onda de voltaje reflejada normalizada:

$$b_n = \frac{V_n - I_n Z_{0n}^*}{2\sqrt{|\Re\{Z_{0n}\}|}} \quad (3.3)$$

donde V_n es el voltaje en la puerta n -ésima, I_n es la corriente en la puerta n -ésima, y Z_{0n} es la impedancia de referencia en la puerta n -ésima.

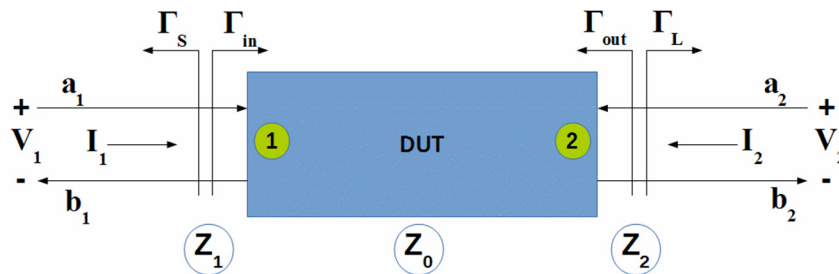


Figura 3.2: Representación esquemática de un bipuerto donde se especifican las ondas de potencia (a , b), las impedancias características y los parámetros de reflexión.

Por lo tanto si queremos conocer cómo se comporta la red con el paso de una señal en un rango de frecuencias determinado, el parámetro que nos interesa es el S_{21} ya que mide la

proporción de señal en la puerta 2 (salida de la red) con respecto a la señal en la puerta 1 (entrada de la red).

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (3.4)$$

Como se puede observar en la Ecuación (3.4), la onda de potencia a_2 deber ser cero, esto significa que en la puerta 2 la impedancia característica ha de ser la misma que Z_0 .

Por otra parte puede ser interesante comprobar cómo de bien se comporta la red cuando se excita con una determinada frecuencia. Podemos medir la cantidad de potencia que se refleja en una misma puerta. En este caso será el cociente entre la señal reflejada b_n y la señal inyectada a_n , que es la definición del parámetro S_{11} ó S_{22} .

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad y \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.5)$$

Si desarrollamos el parámetro S_{nn} llegamos a la conclusión de que el coeficiente de reflexión depende de las impedancias de entrada y de salida de la red.

$$S_{nn}|_{a_{i \neq n}=0} = \Gamma_{in} = \frac{b_n}{a_n} = \frac{\frac{V_n - I_n Z_{0n}^*}{2\sqrt{|\Re\{Z_{0n}\}|}}}{\frac{V_n + I_n Z_{0n}}{2\sqrt{|\Re\{Z_{0n}\}|}}} = \frac{Z_{in} - Z_{0n}}{Z_{in} + Z_{0n}} \quad (3.6)$$

Este parámetro marca la adaptación entre el plano de referencia y la red por lo que será importante tenerlo en cuenta para explicar ciertos efectos en la medida del ancho de banda.

Otros parámetros que podemos medir con el VNA son la fase de las ondas de potencia, el retardo de grupo, o el coeficiente de onda estacionaria. Además es posible visualizar la información en diagramas de Smith.

Calibración

Cuando se trabaja con altas frecuencias las longitudes de los conductores que transmiten las señales eléctricas en los dispositivos empiezan a ser comparables con la longitud de onda de las señales con las que se trabaja. Por lo tanto el lugar donde se realiza la medida tiene mucha importancia, ya que la fase en la que se encuentre la onda determinará el valor de su amplitud [28].

Con el proceso de calibración moveremos los planos de referencia desde los terminales del analizador hasta las puertas de entrada del sistema bajo medida, de forma que será posible obtener los parámetros S asociados únicamente al mismo.

El proceso de calibrado se lleva a cabo con *kits* de calibrado precisos y se realiza siguiendo los pasos que indica el analizador [29]. En general consiste en medir cargas, circuitos abiertos, corto circuitos y líneas de transmisión perfectamente caracterizadas.

Analizador E5071C Agilent

El analizador empleado para el sistema de medida es el E5071C de Agilent. Su rango de frecuencias de funcionamiento es de los 9 kHz hasta los 4.5 GHz. Tiene un alto rango dinámico de unos 130 dB y una velocidad de medida rápida de 8 ms.

Este modelo de VNA dispone de un software actualizado que permite la interconexión entre dispositivos, facilitando los drivers para ser manejado desde un ordenador.

3.2.2. El emisor

El emisor es un transductor eléctrico-óptico encargado de convertir una señal eléctrica en luz. Este elemento constituye una de las partes fundamentales en el proceso de medida.

El dispositivo emisor utilizado para el sistema ha sido un diodo láser. Este dispositivo presenta ciertas ventajas con respecto a otros emisores como los LED. Los diodos láser son capaces de transmitir mucha más potencia que los LEDs y además la luz que emite esta mucho más confinada espacialmente. Por otra parte la emisión de luz es estimulada lo que produce una emisión de fotones con estados de polarización y longitudes de onda casi idénticas, lo que implicara anchuras espectrales pequeñas. Gracias a esta emisión es posible modular la luz con una frecuencia mucho mayor de la que permitirían los LED.

Por otra parte presenta ciertas desventajas como el coste de los dispositivos, la obligatoriedad de polarizar el láser con una corriente determinada y controlar la temperatura de este. Para ello se utilizará una base que se encargue de modular la señal y controlar la temperatura, y un controlador electrónico externo para polarizar el láser.

Polarización del láser y modulación de la señal:

Uno de los parámetros fundamentales del láser es la potencia óptica de emisión. Existen dos zonas de funcionamiento que vienen determinadas por la cantidad de corriente que lo atraviesa. Una zona en la que el láser se comporta como LED debido a la falta de corriente de polarización, y otra en la que la emisión es estimulada y el láser se comporta correctamente.

Es especialmente importante controlar el punto de operación, porque la modulación del láser implica desviaciones en la corriente, lo que podría provocar una rotura del dispositivo si cambiáramos de zona de operación o si superáramos la corriente máxima permitida. La ecuación que modela el comportamiento del láser es la siguiente:

$$P_{optica} = \mu_d \frac{h f}{e} (I - I_{th}) \quad (3.7)$$

siendo I la intensidad eléctrica, I_{th} la intensidad umbral de polarización, f la frecuencia óptica y μ_d eficiencia cuántica que depende del tipo de láser, e la carga del electrón y h la constante de Planck.

Se puede observar como la potencia óptica es directamente proporcional a la intensidad eléctrica que se introduce en el láser solo si se trabaja en zona lineal, siendo muy importante dicha relación para hacer la posterior conversión entre potencia eléctrica y óptica. Para que está relación se cumpla, hay que trabajar con un punto de operación adecuado de forma que el láser tenga un comportamiento lineal y no se produzcan distorsiones en la señal moduladora. La intensidad mínima para que el láser funcione correctamente es la intensidad umbral (I_{th}).

En la Figura 3.3 se muestra la curva característica potencia-corriente de un diodo láser donde se muestra el efecto de la elección correcta del punto de operación y de la modulación.

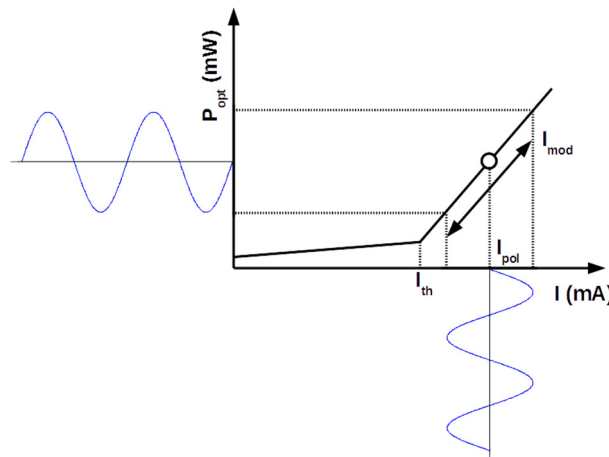


Figura 3.3: Curva característica potencia-corriente de un diodo láser junto con la señal de modulación RF y la señal de potencia óptica.

El diodo láser y la base moduladora

En concreto el modelo de láser utilizado es el DL3147-060 de la marca comercial Sanyo. En la Figura 3.4 se representa la curva característica medida para el componente empleado en este trabajo, mientras que sus características principales se resumen en la Tabla 3.1. En el *Anexo I*, se encuentran las especificaciones completas del dispositivo.

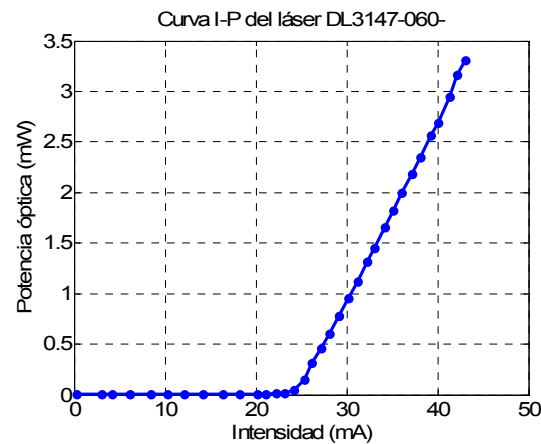


Figura 3.4: Curva característica potencia-corriente del diodo láser DL3147-060.

Característica	Símbolo	Valor
Longitud de onda	λ	650 nm
Potencia óptica de salida	P_{out}	7 mW
Temperatura de trabajo	T_c	25°C
Corriente umbral	I_{th}	20 mA
Corriente de operación típica	I_{op}	30 mA

Tabla 3.1: Características principales de diodo láser DL3147-060.

En cuanto a la base moduladora y controladora de temperatura, se ha elegido el modelo LDM9T/M de Thorlabs. Esta base internamente contiene un circuito que modula la portadora que emite el láser. La señal de RF se introduce por un conector SMA.

La base moduladora y el láser pueden verse como una red de 1 puerta. El parámetro fundamental que caracteriza las redes de una puerta es el coeficiente de reflexión, que indicará cuanta señal se refleja y por lo tanto no es emitida.

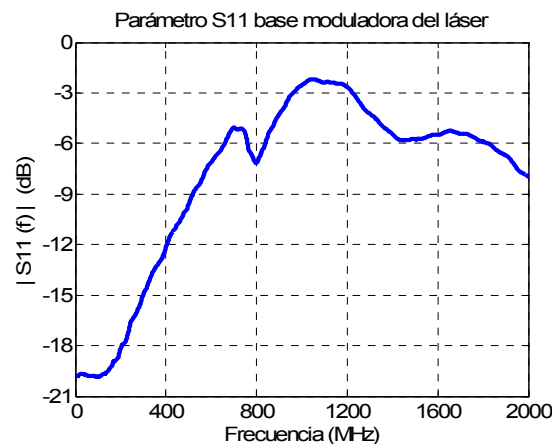


Figura 3.5: Módulo del parámetro S_{11} de la base LDM9T y el láser DL3147-060.

En la Figura 3.5 podemos apreciar como el sistema se comporta adecuadamente para las frecuencias inferiores a 600 MHz y empeora conforme aumenta la frecuencia. Estas características favorecerán la aparición de reflexiones en el dispositivo que se traducirán en efectos indeseables en la respuesta frecuencial del sistema completo.

3.2.3. El detector

El detector es un dispositivo que funciona como transductor óptico-eléctrico. Principalmente está fabricado con materiales semiconductores como los láseres pero realizan el efecto contrario, absorbiendo fotones y generando electrones.

En nuestra aplicación para POF, los detectores deberían presentar un área efectiva grande en comparación con los detectores utilizados para fibras de vidrio, ya que la NA de la POF hace que la luz salga menos confinada y se expanda con mayor rapidez.

Sin embargo los detectores presentan peores respuestas frecuenciales cuanto mayor es su área efectiva. Esto se debe a que la capacidad parásita de un detector es directamente proporcional a su área, y como la constante de tiempo es proporcional a la capacidad, las respuestas serán más lentas.

Es difícil llegar a un equilibrio, por lo tanto en el sistema de medida, se utilizará un solo detector con características intermedias. Los efectos de esta elección estarán muy presentes en el sistema y explicarán algunos efectos que se observaron durante las mediciones.

Detector de Silicio polarizado en inversa:

El modelo elegido ha sido el DET10A/M de Thorlabs, que es un detector con un fotodiodo PIN de Silicio, con voltaje de polarización incluido (incluye una pila y circuito de polarización).

Este detector PIN puede funcionar de dos maneras distintas, como circuito abierto (efecto fotovoltaico) o como fotoconductor (polarizado en inversa).

La corriente eléctrica es generada en la región de depleción de la unión que forman los semiconductores. Una manera de que la intensidad que se genere crezca, es aumentar dicha zona y para conseguirlo hay que añadir una resistencia en serie y aplicar una tensión que polarice el

fotodiodo en inversa. De esta manera se consigue aumentar la Responsividad (R), y por lo tanto disminuir la capacidad parásita de la unión (aumentar el ancho de banda) y conseguir una respuesta frecuencial muy lineal. Sin embargo la corriente de oscuridad aumentará. Esta última depende del material, del área efectiva del detector y de la temperatura.

Por lo tanto trabajaremos en modo fotoconductor, para obtener una respuesta lo más lineal posible y una capacidad parásita muy pequeña que nos ofrecerá anchos de banda mayores.

La relación entre la potencia óptica recibida P_{opt} y la intensidad eléctrica generada I_{PD} es directamente proporcional a la responsividad (R).

$$P_{opt} R(\lambda) = I_{PD} \quad (3.8)$$

Las características principales del detector DET10A/M se muestran en la Tabla 3.1. Las especificaciones completas se encuentran en el *Anexo I*.

Característica	Símbolo	Valor
Material		Silicio
Área Efectiva		Ø 1.0 mm (0.8 mm ²)
Responsividad	$R(\lambda_{peak})$	0.44 A/W
Capacidad del diodo	C_j	6 pF
Corriente de oscuridad (1 MΩ)	I_d	0.3 nA – 2.5nA

Tabla 3.2: Características principales del detector DET10A/M.

A la salida del detector se colocará una impedancia de 50 Ω (adaptada al resto de circuitos) para volver a trabajar con tensiones.

$$V_{out} = I_{out} R_{load} \quad (3.9)$$

3.2.4. El amplificador

Tras la salida del detector, la corriente que se generó es demasiado pequeña para ser medida con equipos convencionales. Por ello se introduce un amplificador que aumente la potencia de la señal. Este amplificador ha de estar diseñado para introducir el mínimo ruido posible, ofrecer la máxima ganancia disponible y en un rango de frecuencias adecuado a los anchos de banda previstos medir para la fibra.

Como la longitud de la fibra es variable, parece lógico que cuanto menor sea la longitud mayor será el ancho de banda y mayor será la potencia que llegue al otro extremo. Por lo tanto se podrá alternar entre amplificadores, que suelen tener propiedades cruzadas (mayor ancho de banda implica menor ganancia).

La relación entre entrada y salida del amplificador es la siguiente:

$$P_{out} = G P_{in} = G \frac{V_{in}^2}{R_{in}} \quad (3.10)$$

Los dos amplificadores utilizados para alternar entre maximizar la ganancia o maximizar la máxima frecuencia de operación son los siguientes:

Amplificador ZKL-1R5+

Las características principales del amplificador ZKL-1R5+ se muestran en la Tabla 3.3.

Característica	Valor
Frecuencia	10 – 1500 (MHz)
Ganancia	40 (dB) Max.
Figura de ruido	3 dB

Tabla 3.3: Características principales del amplificador ZKL-1R5+

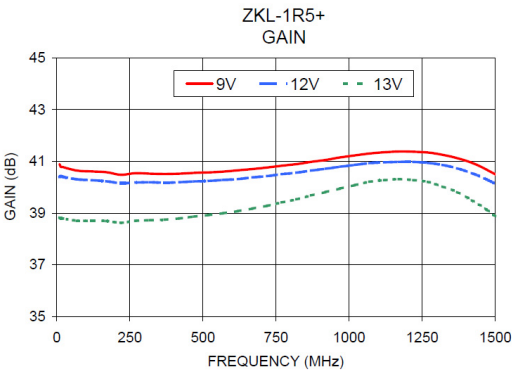


Figura 3.6: Curvas de ganancia del amplificador ZKL-1R5+

Amplificador ZKL-2R5+

Las características principales del amplificador ZKL-2R5+ se muestran en la Tabla 3.4.

Característica	Valor
Frecuencia	10 – 2500 (MHz)
Ganancia	30 (dB) Max.
Figura de ruido	5 dB

Tabla 3.4: Características principales del amplificador ZKL-2R5+

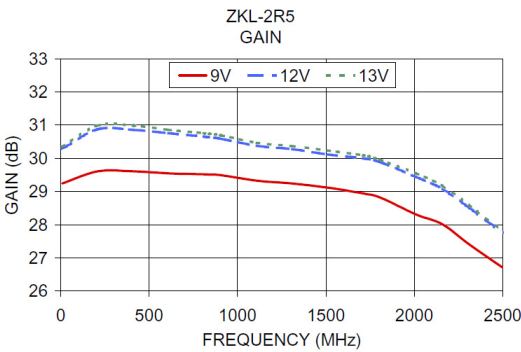


Figura 3.7: Curvas de ganancia del amplificador ZKL-2R5+

En el Anexo I se encuentran las especificaciones completas de sendos dispositivos.

3.3. Sistema de medida del ancho de banda

Como se explicó en el apartado 2 *La fibra óptica de plástico (POF)*, algunos de los inconvenientes más importantes de la POF son los siguientes:

- Fuerte dependencia entre la inyección de la luz y la distribución modal. Este efecto hace que cualquier cambio en la inyección de la luz (desde la separación del láser, el corte de la fibra o la posición) cambie completamente la respuesta frecuencial y por lo tanto el ancho de banda.
- Debido a los materiales que componen la fibra, existe un fuerte acoplo modal a lo largo de la fibra, cambiando el ancho de banda en función de la longitud de esta.
- El punto de equilibrio modal, en el que los modos han alcanzado una distribución normal está mucho más lejos que en las fibras de vidrio. Esto implica trabajar con longitudes de fibra grandes, con el inconveniente de que la fibra óptica de plástico tiene aplicaciones para longitudes cortas (debido a la atenuación que presenta).
- De igual modo que en la inyección, en la detección influye activamente la longitud de separación entre la terminación de la fibra y el detector. Se produce un efecto de filtrado de los modos más externos.
- El proceso de fabricación no es tan regular como en la fibra óptica de vidrio, lo que genera variaciones incluso en fibras del mismo tipo.

Para solventar estos problemas que dificultan la caracterización de la fibra, el sistema propuesto es muy similar al que especifica la normal JIS, con algunas variaciones y algunas correcciones que hacen el sistema más robusto. Además debido a la flexibilidad que ofrece es posible estudiar el ancho de banda de la fibra en diferentes condiciones.

3.3.1. Descripción del sistema

Sin desviarnos de nuestro objetivo de caracterizar el ancho de banda de las POF, con el VNA podemos conocer cuál es el comportamiento de nuestro sistema completo, para ello utilizaremos el parámetro de transmisión S_{21} . El esquema general del sistema con los elementos descritos en el apartado 3.1 *Antecedentes y estado de la técnica* se muestra en la Figura 3.8.

El puerto 1 del VNA se conecta en la entrada de modulación de la base controladora del diodo láser. El puerto 2 del VNA se conecta en el extremo receptor, después del amplificador. De esta manera tendremos una red de 2 puertos con los planos de referencia definidos en el conector SMA de la base controladora y el conector SMA de salida del amplificador.

La fibra óptica que se desea caracterizar se conecta a la salida del emisor y la entrada del detector mediante conectores ST (*Set and Twist*) para POF de 1 mm de diámetro.

Como se describió en el apartado 3.2.3 *El detector*, el detector presenta a su salida una corriente proporcional a la potencia óptica recibida y no una tensión. Por lo tanto será necesario cargar el dispositivo con una carga de 50Ω adaptada a la línea de transmisión para hacer la conversión a tensiones.

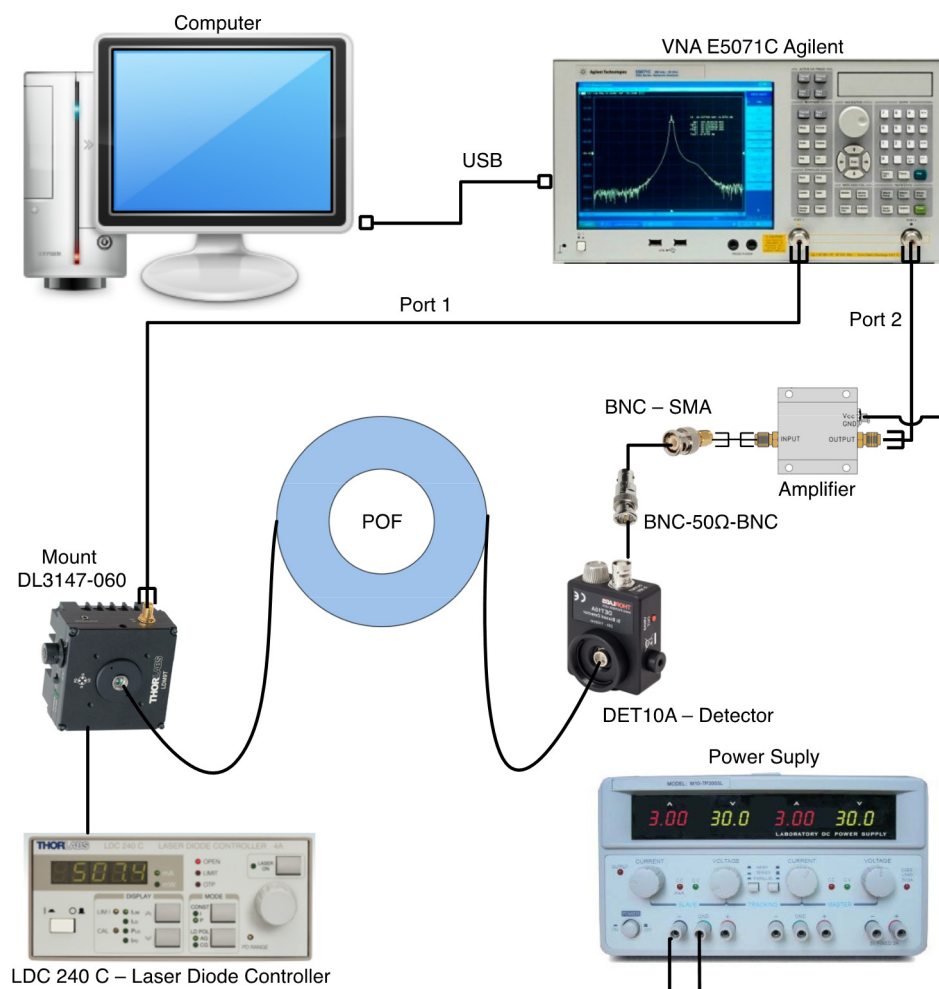


Figura 3.8: Esquemático con los elementos que conforman el sistema de medida del ancho de banda haciendo uso de un Analizador de Redes Vectorial.

Una manera de eliminar la influencia de estos dispositivos es medir la respuesta frecuencial del dispositivo sin POF y de esta manera eliminar esa contribución al resultado final. De forma que es posible aislar la respuesta frecuencial asociada a la fibra $H_{POF}(f)$ de la asociada al resto de dispositivos presentes en el sistema de medida a partir de la medida de la respuesta frecuencial completa $H(f)$ y la medida del sistema sin fibra, $H_{disp}(f)$, operando de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H_{POF}(f) = \frac{H(f)}{H_{disp}(f)} = \frac{H_{POF}(f) H_{disp}(f)}{H_{disp}(f)} \quad (3.11)$$

Este proceso sería sencillo si se trabajase con señales de la misma naturaleza. Pero en nuestro sistema trabajamos con dos tipos de señales, eléctricas y ópticas, realizándose la conversión entre ambas en el emisor y en el detector. Por lo tanto si eliminamos de nuestro sistema el medio de transmisión para las señales ópticas, estaríamos trabajando con dos redes independientes de una puerta (el emisor, y el detector). Así, en este caso el sistema de medida sólo sería capaz de medir los coeficientes de reflexión en el puerto de entrada del emisor y en el puerto de salida del receptor en función de la frecuencia. Mientras que, al no producirse una transmisión efectiva de potencia entre ambos puertos no tendría sentido calcular el coeficiente de transmisión que directamente nos proporciona la respuesta frecuencial del sistema.

Para solucionar este problema y poder seguir utilizando el modelo de una red de dos puertas, se puede utilizar como medio de guiado de la luz un tramo de POF de longitud corta, unos pocos centímetros, que denominaremos **referencia**. Asumiremos que esta fibra corta no alterará las propiedades de la señal óptica ya que ni la atenuación ni otros efectos son apreciables para longitudes tan cortas.

Ahora sí es posible obtener una respuesta frecuencial de la POF que se desea medir a partir de la respuesta frecuencial del sistema completo:

$$\frac{H(f)}{H_{disp}(f)} = \frac{H_{em}H_{POF}(f)H_{det}(f)H_{amp}(f)}{H_{em}H_{ref}(f)H_{det}(f)H_{amp}(f)} = \frac{H_{POF}(f)}{H_{ref}(f)} \Big|_{H_{ref}(f)=1} = H_{POF}(f) \quad (3.12)$$

$H_{em}(f)$, $H_{det}(f)$ y $H_{amp}(f)$ las respuestas frecuenciales de emisor, detector y amplificador, respectivamente, mientras que $H_{ref}(f)$ es la respuesta frecuencial de la fibra corta, que asumiremos no introduce ningún efecto sobre la señal.

Por lo tanto para medir la respuesta de un tramo de POF bajo unas ciertas condiciones, será necesario normalizar con respecto a la respuesta del sistema usando como fibra una referencia. Esto implica tener que realizar la medida del sistema con la referencia cada vez que se varíe alguna de las condiciones de medida, como por ejemplo algún dispositivo.

En los razonamientos anteriores se ha obviado una respuesta frecuencial que sí influye activamente en el resultado, la respuesta frecuencial de los cables que conectan el VNA con el emisor y el detector respectivamente.

Para descontar ese efecto el proceso para obtener una medida correcta consiste en una calibración inicial del VNA con el *kit* de calibrado correspondiente. Este calibrado se ha de realizar con la configuración del VNA que se utilizará para caracterizar el ancho de banda de la POF, entre otros parámetros de especial importancia son: la frecuencia de inicio y final del barrido y la potencia de la modulación. En caso de que se varíen los parámetros a un rango mayor o se cambien los cables la calibración se ha de realizar de nuevo. Tras finalizar el proceso de calibrado, es posible guardar el estado del equipo en un registro de memoria.

En la Figura 2.1 se describe el efecto del calibrado del VNA, así como los dispositivos que constituirán el DUT.

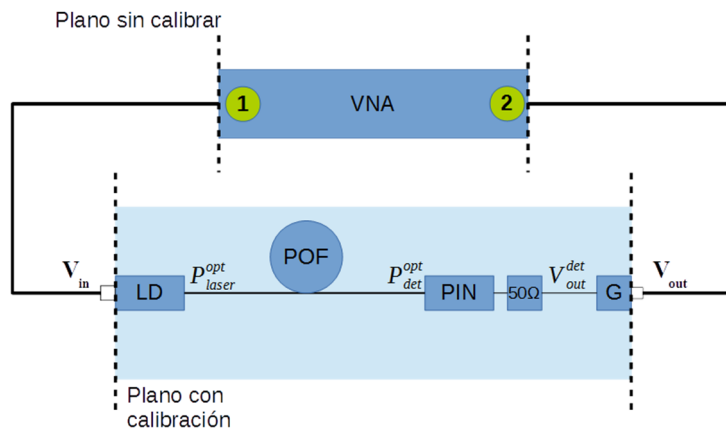


Figura 3.9: Esquema del sistema de medida con los cambios de plano después de la calibración.

El ancho de banda se puede definir de múltiples formas, pero una de las más utilizadas es el ancho de banda cuando la potencia óptica se ha reducido en la mitad del máximo, lo que es conocido como el **ancho de banda a 3 dB**.

El VNA puede medir tanto módulo como fase del parámetro S_{21} , pero para nuestra medida será suficiente centrarnos en el módulo de dicho parámetro.

$$B = 20 \cdot \log_{10}|S_{21}| \quad (3.13)$$

Dado que en nuestro sistema de medida las señales no se mantienen en el dominio eléctrico, la medida del ancho de banda no es directamente la frecuencia en la que la potencia eléctrica disminuye a la mitad. Veamos con más detalle la forma cómo la potencia óptica se refleja en la medida de respuesta frecuencial que obtenemos.

Aplicando la definición del parámetro S_{21} :

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \frac{\frac{V_2 - I_2 Z_0^*}{2\sqrt{\Re\{Z_0\}}}}{\frac{V_1 + I_1 Z_0}{2\sqrt{\Re\{Z_0\}}}} = \left. \frac{V_2 - I_2 Z_0}{V_1 + I_1 Z_0} \right|_{\substack{a_2=0 \\ V_2 = -I_2 Z_0}} = \frac{V_2}{V_1} \frac{2}{1 + \frac{Z_0}{Z_1}} = \frac{V_2}{V_1} \zeta \quad (3.14)$$

siendo ζ una constante que dependerá de la frecuencia.

Si reescribimos la tensión de entrada V_1 o V_{in} y la tensión de salida V_2 o V_{out} en términos de los parámetros que caracterizan los dispositivos de la red obtenemos:

Láser:
$$P_{laser}^{opt} = \mu_d \frac{hf}{e} (I - I_{th}) = \eta I_{in}^{laser} = \frac{\eta}{Z_{in}} \cdot V_{in} \Rightarrow V_{in} = \frac{Z_{in}}{\eta} P_{laser}^{opt} \quad (3.15)$$

Detector:
$$P_{det}^{opt} R(\lambda) = I_{out}^{det} = \frac{V_{out}^{det}}{R_{load}} \Rightarrow V_{out}^{det} = P_{det}^{opt} \cdot R_{load} \cdot R(\lambda) \quad (3.16)$$

Amplificador:
$$V_{out}^{amp} = \sqrt{G} V_{in}^{amp} \quad (3.17)$$

Así, en la expresión (3.15) se observa que la potencia óptica a la entrada de la fibra es proporcional al voltaje de modulación que se le aplica y que constituye la señal eléctrica de entrada al DUT. Por otra parte, las ecuaciones (3.16) y (3.17) reflejan que la señal de salida del DUT, que se corresponde con el voltaje de salida del amplificador es también proporcional a la potencia óptica a la salida de la fibra. Así, para nuestro sistema de medida, el parámetro S_{21} se relaciona con las potencias ópticas de entrada y salida a la fibra de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S_{21}(f) &= \zeta \frac{V_{out}}{V_{in}} = \zeta \frac{\sqrt{G(f)} V_{in}^{amp}}{\frac{Z_{in}}{\eta} P_{laser}^{opt}(f)} = \zeta \frac{P_{det}^{opt}(f) \cdot R(\lambda) \cdot R_{load} \cdot \sqrt{G(f)}}{\frac{Z_{in}}{\eta} P_{laser}^{opt}(f)} \\ &= K(\lambda, f) \cdot \frac{P_{det}^{opt}(f)}{P_{laser}^{opt}(f)} = K(\lambda, f) \cdot \frac{P_{out}^{opt}(f)}{P_{in}^{opt}(f)} = K(\lambda, f) \cdot H_{POF}(f) \end{aligned} \quad (3.18)$$

siendo $H_{POF}(f)$ la respuesta frecuencial equivalente del tramo de POF y $K(\lambda, f)$ una constante que agrupa al resto de constantes de la expresión (3.18).

Finalmente a partir de las medidas en escala logarítmica de S_{21} con el tramo de fibra POF y con la referencia, es posible expresar la respuesta frecuencial de la POF:

$$\begin{aligned}
 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{S_{21}^{POF}}{S_{21}^{ref}} \right| &= 20 \cdot \log_{10} \left| K(\lambda, f) \frac{P_{out}^{opt,POF}}{P_{in}^{opt,POF}} \right| - 20 \cdot \log_{10} \left| K(\lambda, f) \frac{P_{out}^{opt,ref}}{P_{in}^{opt,ref}} \right| = \\
 &= 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{H_{POF}}{H_{ref}} \right| \cong 20 \cdot \log_{10} |H_{POF}|
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Para determinar el ancho de banda a 3 dB hay que evaluar en qué valor de frecuencia $H_{POF}(f)$ se ha reducido a la mitad.

$$20 \cdot \log_{10} |H_{POF}| \xrightarrow{H_{POF} = 1/2} 20 \cdot \log_{10} \frac{1}{2} = -6 \text{ dB} \tag{3.20}$$

Por lo tanto el ancho de banda será la frecuencia a la que la respuesta frecuencial del sistema, descontando la referencia, haya caído **6 dB**.

3.3.2. Procedimiento de medida

El proceso de medida del ancho de banda en las POF ha de ser riguroso y repetitivo de manera que exista la menos variabilidad posible en los resultados.

Para realizar una medida de ancho de banda el proceso es el siguiente:

1. Preparar los extremos de la fibra óptica, para ello, realizar un corte con una cortadora especial de POF, eliminar la cubierta, conectorizar y realizar un pulido.
2. Conectar la fibra en el sistema y comprobar si con la configuración de los dispositivos (potencia de polarización, potencia de modulación, ganancia de amplificación) se puede apreciar la respuesta frecuencial. En caso contrario, variar los dispositivos y configuraciones dentro de los límites de los mismos. Si la respuesta frecuencial está por encima del nivel de ruido se podrá medir.
3. Con los parámetros correctamente definidos, realizar una calibración del VNA. La calibración se realizará cada vez que se modifiquen los planos de referencia.
4. Con un tramo corto de fibra, realizar una medida que servirá como referencia. Esta referencia tiene que ser tomada una vez que la configuración del sistema no va a variar.
5. Mediante el software desarrollado para el sistema, realizar la medida de los parámetros deseados, como mínimo es necesario el módulo del parámetro S_{21} .
6. Procesar los resultados, eliminando las interferencias y descontando la referencia.
7. Buscar la frecuencia para la cual la respuesta frecuencial ha caído 6dB.

3.4. Sistema software

El procedimiento de medida propuesto requiere de un sistema automatizado de medida que sea capaz de capturar, almacenar y procesar una gran cantidad de información. Por cada medida que se realiza al menos es necesario almacenar información relativa al parámetro de transmisión S_{21} , si bien en este trabajo se guardan además la información relativa al retardo de grupo y la fase.

Para facilitar la obtención de los datos, se ha desarrollado un programa con una interfaz gráfica muy amigable, que se conecta mediante USB al VNA. Los drivers de Agilent “IO Libraries Suite” [30] junto con IVI Drivers [31] permiten que el sistema operativo se conecte con otros interfaces

distintos al GPIB, facilitando la interconexión. Posteriormente Agilent proporciona ciertos drivers para manejar el VNA desde diferentes entornos [32], como Visual C++, Visual C#, Visual Basic, MatLab, LabView...

El entorno elegido ha sido MatLab por su capacidad para procesar señal de manera eficiente. Un *toolbox* incluido en MatLab, *Instrument Control Toolbox* y la herramienta *Test & Measurement Tool* [33], permiten manejar ciertos instrumentos de manera genérica como osciloscopios, generadores de señal... Sin embargo como las librerías para manejar el VNA E5071C de Agilent estaban disponibles para MatLab R2010a x32 se optó por configurar un objeto de tipo Instrumento en MatLab con las funciones específicas del VNA E5071C Agilent.

MatLab dispone de una herramienta de creación de entornos gráficos [34], GUIDE, que permite insertar elementos básicos como botones, ejes, selectores, recuadros de texto... y configurar sus acciones con funciones añadidas al programa. Para realizar la comunicación entre elementos del entorno y las funciones que llevan asociadas se utiliza un objeto común accesible desde cada función.

3.4.1. Interfaz Gráfico

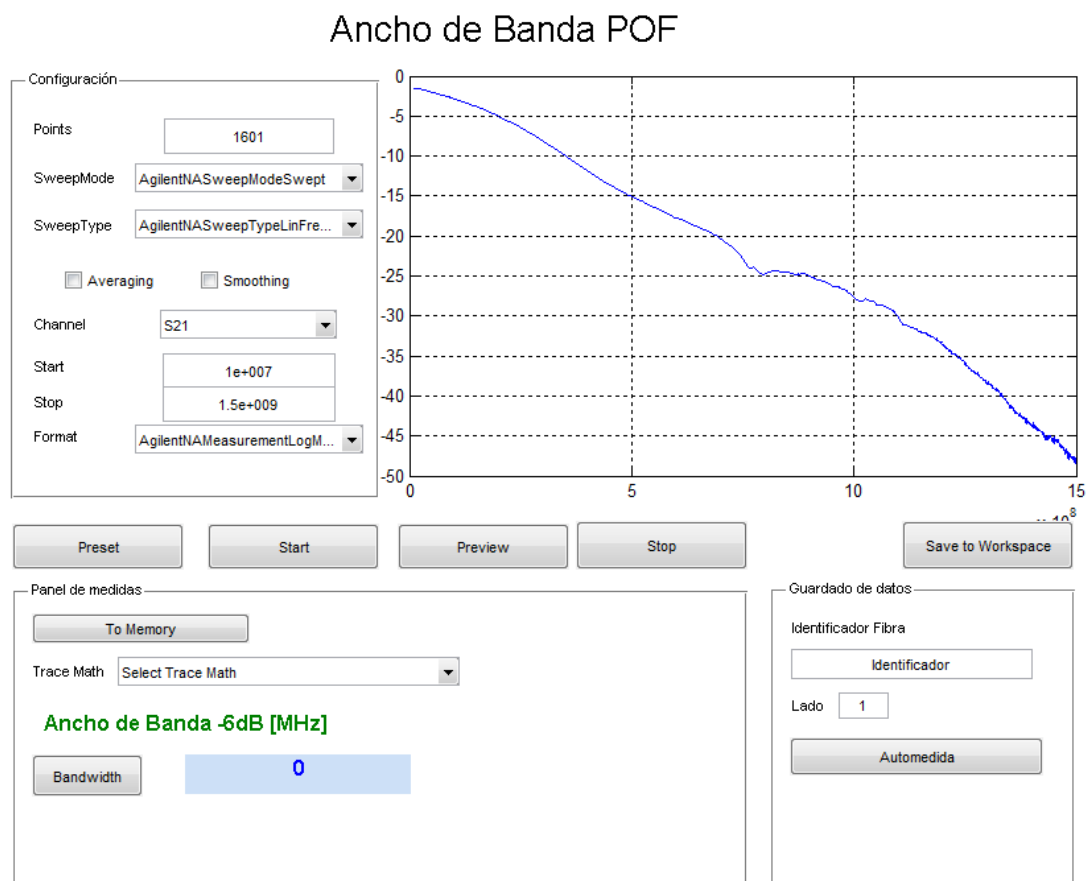


Figura 3.10: Interfaz gráfico de usuario desarrollada en MatLab para manejar el VNA y almacenar los datos.

Como puede observarse, el programa dispone de tres secciones:

- La sección de **configuración** dispone de varios parámetros que se pueden configurar en el VNA para realizar las medidas. Entre ellos aparecen el tipo de barrido, las frecuencias de inicio y final y el número de puntos. Otras opciones de procesamiento interesantes del analizador, son la posibilidad de hacer medias de las señales o *smoothing*.

Al tratarse de un VNA es capaz de medir la fase de la señal y por lo tanto los parámetros S. Para almacenar estas medidas se puede seleccionar el parámetro S que se desea medir, y seleccionar el tipo de medida que se va a llevar a cabo como la magnitud en dB, la fase, la fase desenrollada, el coeficiente de onda estacionaria o incluso los diagramas de Smith de los coeficientes de reflexión.

Si el usuario no es experimentado, existe la posibilidad de definir unos parámetros básicos con el botón *Preset*. Para aplicar estos parámetros hay que pulsar el botón *Start*.

- Los **ejes de representación** suponen una herramienta muy útil para visualizar la información en tiempo real en caso de que el usuario no esté delante del analizador. Para empezar a visualizar la información hay que pulsar el botón *Preview*, de igual modo pulsar el botón *Stop* para detener la visualización. El sistema de previsualización obtiene la información del analizador de redes con una determinada frecuencia, sin embargo MatLab no permite trabajar con sistemas multiproceso de manera compatible con todos los sistemas, por lo tanto para obtener la información se hace uso de interrupciones. Esto permite que la interfaz gráfica funcione con total normalidad, pero impida realizar cambios, manuales en el VNA.

- El panel de **medidas y guardado de datos** proporciona al usuario la capacidad de almacenar los datos tanto en el VNA como en el ordenador donde se ejecuta el programa. El panel de medidas rápidas permite aplicar operaciones en la señal que se está midiendo. Por ejemplo sumar, dividir... la señal que se está midiendo con una señal almacenada en memoria.

Habiendo hecho correctamente las operaciones necesarias es posible estimar el ancho de banda de la fibra pulsando el botón *Bandwidth*.

Si por el contrario los datos se desean almacenar en el ordenador existe un botón de guardado que extrae los datos de VNA y los almacena como una variable en el *Workspace* de MatLab. Para facilitar el etiquetado de las variables, los campos de selección de nombre se auto rellenan en función de los parámetros que se han preestablecido en el VNA.

Como en muchas ocasiones los datos que se van a recoger incluyen varios parámetros existe la posibilidad de hacer un autoguardado, que configurará el VNA para obtenerlos rápidamente. Es imprescindible rellenar los datos identificativos correctamente para evitar problemas de sobrescritura.

3.4.2. Sistema de control y funciones del interfaz gráfico.

En general existe una rama principal de funciones básicas para manipular el VNA. El proceso comienza con una función de inicialización que establece la comunicación en un determinado puerto y crea un objeto de tipo VNA manipulable.

A partir de ese momento el VNA tiene dos tipos de funciones, las de tipo INVOKE, y las de tipo SET y GET. Las de tipo INVOKE se utilizan para establecer propiedades en el VNA como el canal que se va a medir, el número de puntos, el formato (magnitud, fase, diagrama de Smith...).

Las funciones SET and GET controlan otros parámetros que modifican la medida, como la escala, la media o el *smoothing*. Con estas funciones se aplican y obtienen los datos introducidos por el usuario en el interfaz gráfico.

El software funciona como una máquina de estados que espera la interacción del usuario. Finalmente el programa termina siempre, con una función de desconexión del VNA, que evita que el analizador se bloquee. Algunas de las funciones más interesantes del programa son las siguientes:

- Recuperar un estado anterior del VNA, con la calibración memorizada.
- Cambiar los parámetros de configuración del VNA.
- Visualizar en tiempo real las medidas del VNA.
- Guardar la información automáticamente con un nombre relativo a la configuración.
- Realizar una automedida de los principales parámetros (S_{21} , fase desenrollada y retardo de grupo)
- Medir la referencia con la configuración actual del sistema.

El esquema general es el siguiente:

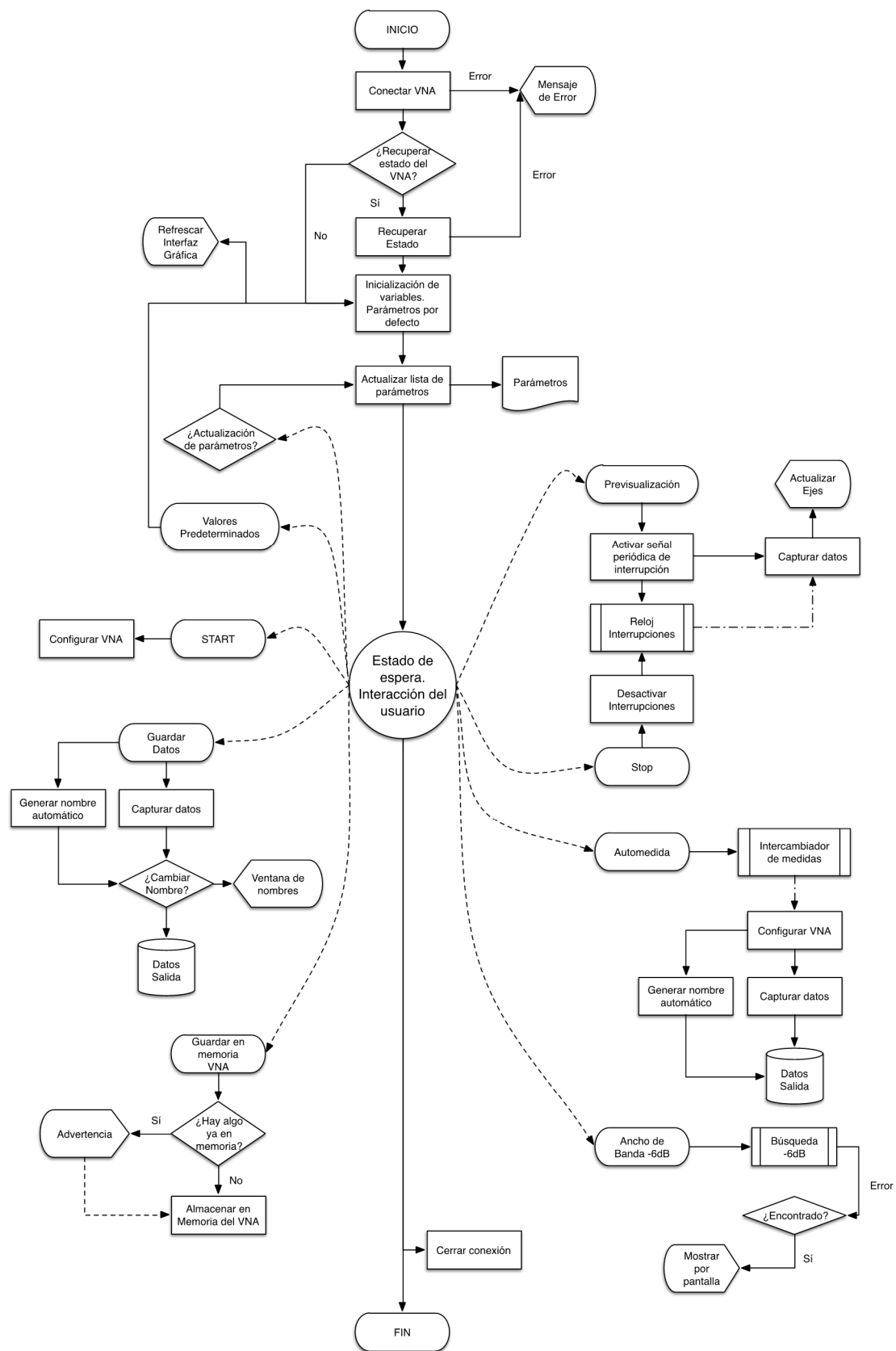


Figura 3.11: Esquema de funcionamiento del sistema de control e interfaz gráfica para el control del VNA desde un ordenador con el entorno de MatLab.

3.4.3. Tratamiento y clasificación de las señales.

Debido al gran volumen de datos que puede ser obtenido del VNA, es necesario implementar una función que organice la información.

Cuando el usuario haya obtenido toda la información necesaria, se ofrece una función con prototipo

```
[...,Lref]=agruparDatos(archivoDatos,ident,nombres,dist,param,freq,nLados)
```

Función que agrupa en estructuras los datos obtenidos del VNA.

```
archivoDatos: Nombre del archvo .mat que contiene la información
generada por el software de medición.
ident: Vector de celdas con la etiqueta empleada para nombrar a la
fibra.
nombres: Vector de celdas con los nombres de las estructuras que se
desean como resultado.
dist: Vector con las longitudes de las fibras.
param: Vector de celdas con los nombre de las mediciones del VNA.
{'s21','up','gd'}.
freq: Vector con la etiqueta de la frecuencia máxima de barrido en MHz.
nLados: Vector con el número de lados de cada fibra.
```

que permite agrupar la información de manera automática. Para que la función funcione correctamente, es necesario pasarle como parámetro un archivo con extensión *.mat* con las variables obtenidas del programa anterior. Es imprescindible que las variables sigan el formato que recomienda el programa:

```
[x_param_identificador_freqmax_lado] [y_param_identificador_freqmax_lado]
```

Además es necesario que en ese archivo quede definida la potencia de modulación, la intensidad de polarización del láser y las medidas de las referencias.

Con esta función obtendremos unas estructuras de MatLab con toda la información agrupada. Hay que destacar el potencial de esta función que tiene que localizar y realizar las agrupaciones en función de los nombres de cada variable, lo que añade cierta complejidad en la sintaxis del programa.

3.4.4. Post-procesado de las señales obtenidas.

En el apartado 3.2.2 *El emisor* se ha recalado la importancia del parámetro S_{11} del *mount* del láser. Experimentalmente se ha detectado que midiendo el parámetro S_{21} aparecían unas oscilaciones con un rango dinámico muy amplio sumadas al barrido frecuencial, que afectaba directamente a la calidad de la medida.

Este hecho se debe a las múltiples reflexiones que se producen en el emisor debido a la desadaptación de impedancias. Estas reflexiones se suman constructivamente o destructivamente en función de la longitud eléctrica que recorren, que depende de la frecuencia y de la longitud de la fibra óptica. Por lo tanto la frecuencia de la oscilación interferente coincide con el inverso del tiempo de propagación en la fibra.

En la Figura 3.12 se muestra la influencia de la longitud de la fibra óptica en el periodo de las oscilaciones interferentes.

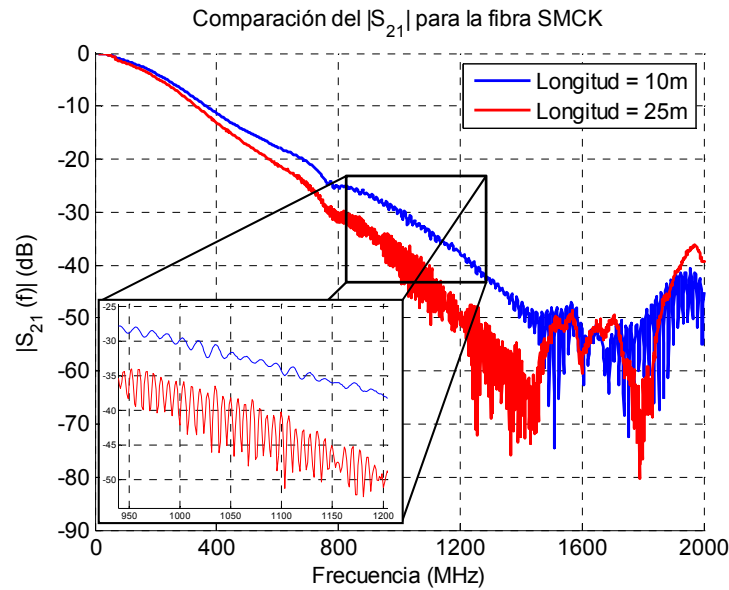


Figura 3.12: Comparación de la frecuencia de las oscilaciones interferentes para dos longitudes de fibra SMCK.

Cuando la longitud de la fibra es mayor, por lo tanto el retardo de propagación es mayor, la frecuencia de la oscilación aumenta, cuando la longitud disminuye, la frecuencia de la oscilación disminuye. Para paliar este efecto tan indeseable se optó por realizar un filtro de media móvil selectivo.

El filtro de media móvil consiste en sustituir cada muestra de una señal por la media de un determinado número de valores adyacentes a la muestra. Se puede ver como una ventana deslizante que media la señal por intervalos.

Para que el sistema sea automático, es necesario calcular la frecuencia de la oscilación en cada barrido frecuencial y así seleccionar un tamaño de ventana adecuado que no falsee las medidas pero elimine la oscilación interferente. En la Figura 3.13 se puede observar el efecto del algoritmo de filtrado mediante media móvil para la respuesta frecuencial en una MC-POF de 15 m.

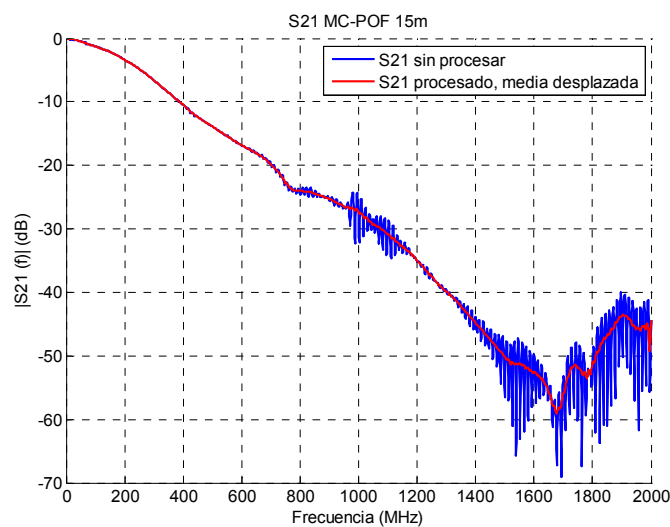


Figura 3.13: Ejemplo de corrección del parámetro $|S_{21}|$ mediante el filtrado de media móvil.

Una vez que el barrido frecuencial ha sido filtrado, se pueden realizar el resto de acciones, como dividir el barrido entre la señal de referencia y buscar el ancho de banda a -6dB. El sistema

está programado para interpolar la referencia en caso de que el barrido frecuencial haya sido tomado hasta una frecuencia menor que la de la referencia.

Toda la información puede ser tratada en la misma función, independientemente de los parámetros de las medidas, lo que le confiere una gran rapidez y flexibilidad. Al usuario se le entregan estructuras de datos con la información procesada y clasificada.

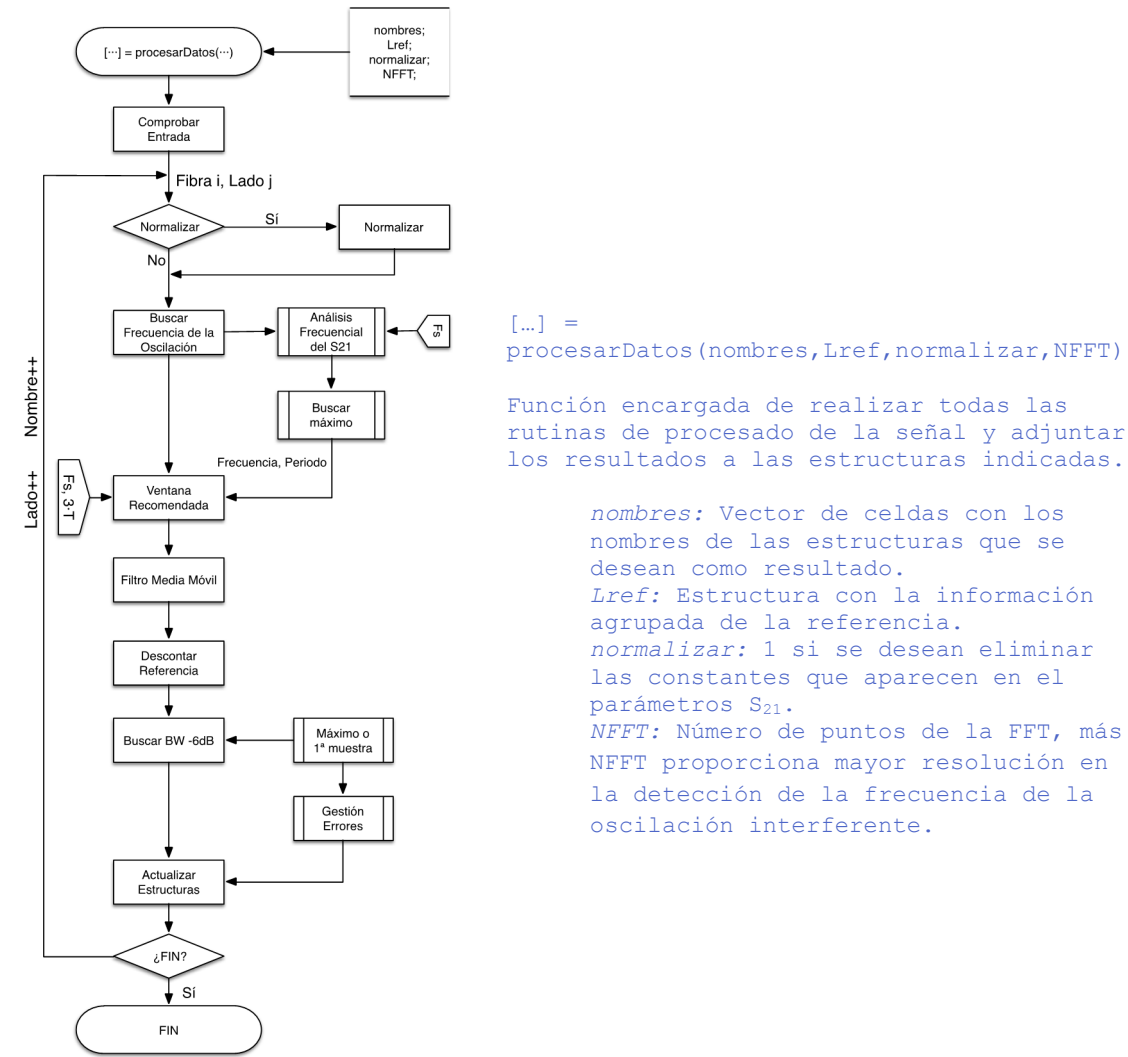


Figura 3.14: Esquema de funcionamiento del algoritmo encargado de *Post-Procesar* la información obtenida del VNA.

4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos con el método de medida de la respuesta frecuencial en POF explicado anteriormente. En particular, se han caracterizado varios tramos de fibra de un único núcleo de distintos fabricantes y con distintas longitudes, lo que nos ha permitido comprobar la validez del método y analizar las causas de las variaciones encontradas. Finalmente y como resultado más trascendente de este trabajo, se ha caracterizado una fibra MC-POF comercial utilizando el método de corte.

4.1. Validación del sistema con SC-POF

En estudios anteriores se realizaron medidas del ancho de banda en SC-POF con diferentes métodos, como el barrido frecuencial con equipos de propósito general o el método de medida en el dominio temporal mediante pulsos, citados en el apartado 3.1 *Antecedentes y estado de la técnica*. Además como alternativa a estos sistemas también se realizaron estudios de ancho de banda utilizando un analizador de redes escalar.

Para verificar que con el nuevo sistema de medida con VNA, se obtienen resultados coherentes, se hicieron mediciones con las mismas fibras ópticas que fueron caracterizadas con los anteriores sistemas [23]–[25].

Barrido frecuencial con sintetizador de frecuencias y osciloscopio

Las curvas representadas en la Figura 4.1 y la Figura 4.2 comparan los resultados obtenidos con el sistema experimental presentado en este trabajo, con los obtenidos con el sistema implementado previamente basado en el método de barrido frecuencial con equipamiento de propósito general [6], [23]. En ambos se han usado tramos de distintas longitudes de fibra POF de un único núcleo con un diámetro de 1 mm fabricadas en PMMA y comercializadas por Hewlett Packard (HFBR-RUS500) y Mitsubishi (ESKA PREMIER GH4001), respectivamente.

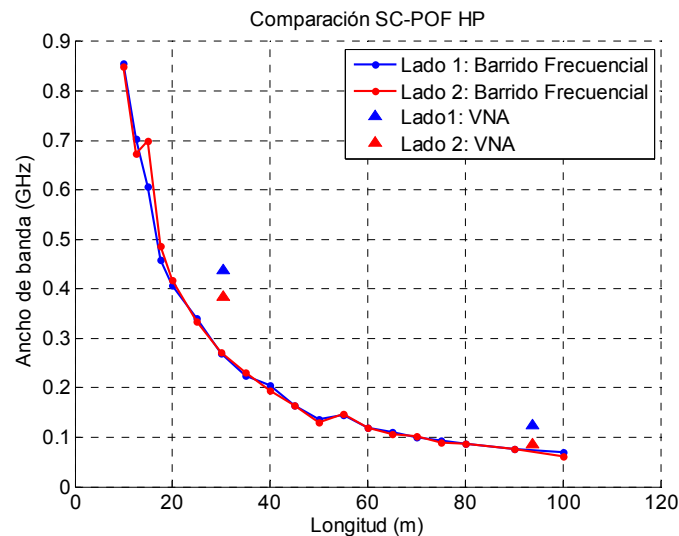


Figura 4.1: Comparación de anchos de banda para una SC-POF de la marca HP con el sistema de barrido frecuencial con dispositivos de propósito general [23] y el sistema presentado en este trabajo con VNA.

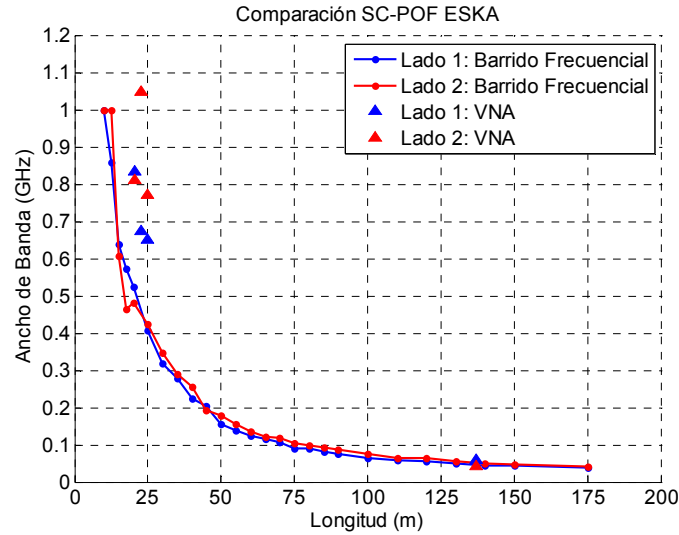


Figura 4.2: Comparación de anchos de banda para una SC-POF de la marca ESKA con el sistema de barrido frecuencial con dispositivos de propósito general [23] y el sistema presentado en este trabajo con VNA.

Hay que notar que las medidas obtenidas en otros proyectos se realizaron para un conjunto más amplio de longitudes al aplicarse el método de corte. Sin embargo, en nuestro caso, sólo disponemos de tramos de unas determinadas longitudes. En ambos experimentos, se midieron los tramos de fibra alternando el extremo por el que se realizaba la inyección para tener una estimación de la repetitividad del método.

Como observación general de los resultados mostrados, se puede afirmar que para los dos tipos de SC-POF considerados, con el sistema de medida basado en el VNA obtenemos valores mayores de ancho de banda.

Además se puede apreciar como para longitudes de fibra cortas existe una gran variabilidad en función del lado que se conectó al emisor. Este efecto desaparece para longitudes largas de fibra. Por ejemplo para la longitud de 25 m de la fibra ESKA existe una variación de 300 MHz, que es mucho menor en 137 m.

En longitudes cortas, la distribución angular de la potencia óptica a la salida del tramo de fibra es extremadamente dependiente de las condiciones de inyección, es decir, de la distribución angular de la luz a la entrada de la fibra, así como, de las características de acoplo modal y atenuación diferencial de la fibra, lo que explica la mayor variabilidad. A partir de aproximadamente 100 m se alcanza la **distribución modal de equilibrio** (EMD, *Equilibrium Mode Distribution*) [35] por lo que los resultados se independizan de las condiciones de medida, como se puede observar en los resultados anteriores.

Barrido frecuencial con analizador de redes escalar

El sistema de barrido frecuencial con analizador de redes escalar es el más parecido al presentado en este trabajo [24], [36]. En la Figura 4.3 se comparan los valores de ancho de banda obtenidos con este método de medida con los obtenidos en el presente trabajo. En concreto, se ha caracterizado una fibra SC-POF con núcleo de 1 mm de diámetro suministrada por la compañía Boeing.

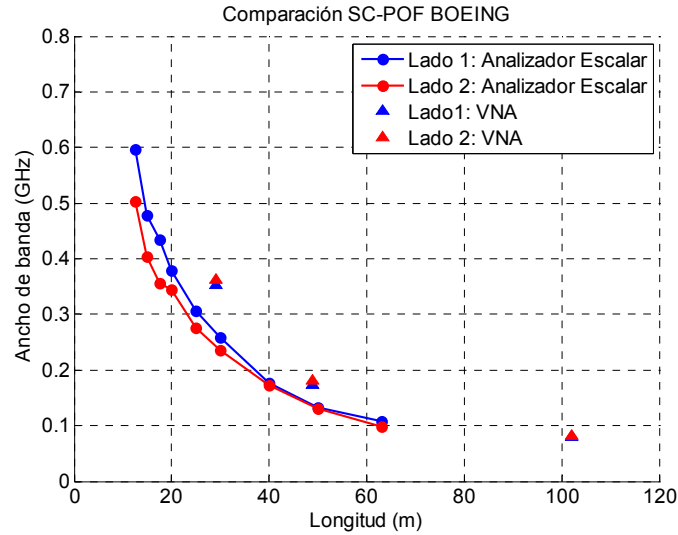


Figura 4.3: Comparación de anchos de banda para una SC-POF de la marca BOEING con un Analizador de Redes Escalar [25] y el sistema presentado en este trabajo con VNA.

En los resultados mostrados se pueden apreciar los mismos dos efectos generales ya observados en la comparación anterior: nuestro método obtiene mayores valores de ancho de banda y la variabilidad de la medida disminuye conforme aumenta la longitud de la fibra.

Explicación de las variaciones entre sistemas

Las diferencias encontradas al comparar nuestros resultados con los obtenidos anteriormente están producidas principalmente por un efecto de filtrado en el detector que depende de dos parámetros, el área de éste y la distancia de separación entre la fibra y el detector.

En el proyecto basado en el analizador de redes escalar [25] se utilizaba un detector con un área mayor, 1.2 mm^2 , que en el actual trabajo en el que el detector tiene 0.8 mm^2 de área. El detector de área menor produce un efecto de filtrado de los modos de mayor orden, o lo que es lo mismo, ángulos de propagación mayores. Los modos de orden alto recorren una longitud efectiva mayor que los modos de menor orden adquiriendo un retraso temporal que genera dispersión y limita el ancho de banda. La luz que sale de la fibra con ángulos altos no es captada por un detector de área más pequeña por lo que al eliminarse los modos de orden alto con mayores retardos, hay un aumento del ancho de banda. Este efecto fue verificado en otros proyectos realizados anteriormente [24]. Por ejemplo variando el área del detector entre 0.8 mm^2 y 0.2 mm^2 para una fibra de 50 m, el ancho de banda resultante era de 162.4 MHz y 243.3 MHz respectivamente.

Por otra parte, en el proyecto basado en dispositivos de propósito general [23], el detector utilizado presentaba un área igual que el detector de este trabajo, 0.8 mm^2 . Sin embargo el tipo de conector empleado *VersaLink* (VL) era distinto al utilizado en este sistema (ST-1mm). En general, el conector VL permite una mayor proximidad de la fibra al detector. La consecuencia del aumento de la distancia fibra-detector en nuestro sistema de medida es análoga a la debida a la disminución del área del conector, un filtrado de los modos de mayor orden y por tanto una disminución de la dispersión modal. En nuestro montaje, hemos comprobado experimentalmente como la distancia del extremo final de la fibra al detector afecta al ancho de banda modificando manualmente la conexión fibra-detector. Este efecto de filtrado espacial ya es conocido por el grupo y ha sido observado experimentalmente anteriormente [37].

El efecto de filtrado espacial en la detección se muestra esquemáticamente en la Figura 4.4, en la que se pueden observar los casos de reducción de área del detector (centro) y de aumento de la distancia fibra-detector (abajo) con respecto a una situación de referencia (arriba).

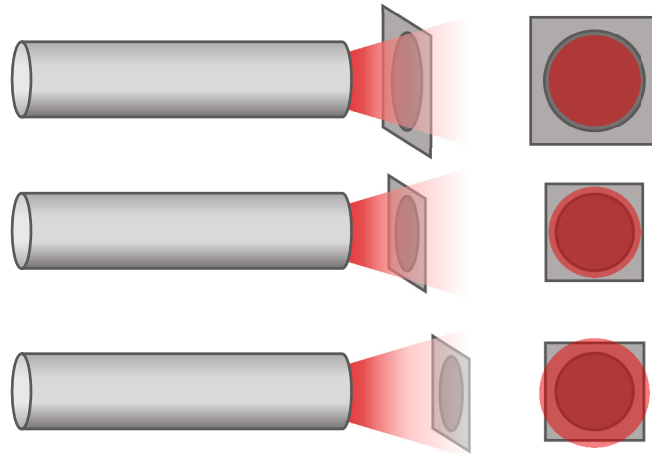


Figura 4.4: Esquema del efecto de filtrado espacial que se produce en el detector. a) El área que ilumina la fibra queda contenida en el detector, b) El área que ilumina la fibra ilumina un área mayor que el detector, c) La distancia a la que se encuentra la fibra hace que el área que ilumina la fibra sea mayor que el detector.

Una vez operativo nuestro método de medida, comprobados los resultados que ofrece y analizadas las causas que determinan las variaciones que podemos encontrar, a continuación pasamos a realizar la caracterización del ancho de banda en fibras de múltiples núcleos.

4.2. Caracterización frecuencial MC-POF

El objetivo principal del presente trabajo, consiste en caracterizar la respuesta frecuencial de una fibra óptica de plástico de múltiples núcleos. La fibra óptica utilizada, es el modelo SMCK-1000 de la casa Asahi KASEI de 19 núcleos y con un diámetro total de 1 mm, equivalente al de una fibra SC-POF estándar. Las especificaciones completas se encuentran en el *Anexo I*.

4.2.1. Estudios previos

Antes de llevar a cabo las medidas de ancho de banda de la fibra se realizaron algunas comprobaciones para explicar ciertos efectos no conocidos en las MC-POF y determinar las condiciones de medida.

Distribución de potencia de campo cercano

Es conocido que la luz a la salida de las fibras SC-POF estándar se distribuye de forma uniforme iluminando todo el núcleo. Este hecho ocurre aunque se inyecte la luz con poca apertura numérica (ángulos de incidencia pequeños), y es debido al fuerte acoplo modal que presenta la fibra [2]. En el caso de las MC-POF, la inyección determinará la cantidad de luz que se guiará por cada uno de los núcleos y que, debido a la escasa transferencia de potencia inter-núcleo observada en medidas preliminares, se mantendrá muy similar a lo largo de la fibra.

Hemos comprobado experimentalmente que el láser que usamos en nuestro sistema de medida es altamente elíptico, lo que hace que la potencia de luz inyectada y guiada por los distintos núcleos sea muy heterogénea. Para iluminar los núcleos de la fibra de forma más homogénea, se ha conectado a la fuente un tramo corto de SC-POF, que permite compensar la excentricidad del láser y aumentar la apertura de la luz inyectada en la MC-POF [13].

Enfocando una cámara al extremo de salida de la fibra, se pueden medir las distribuciones de potencia de campo cercano cuando se conecta directamente la fibra al emisor, o cuando se conecta a través del tramo corto de SC-POF.

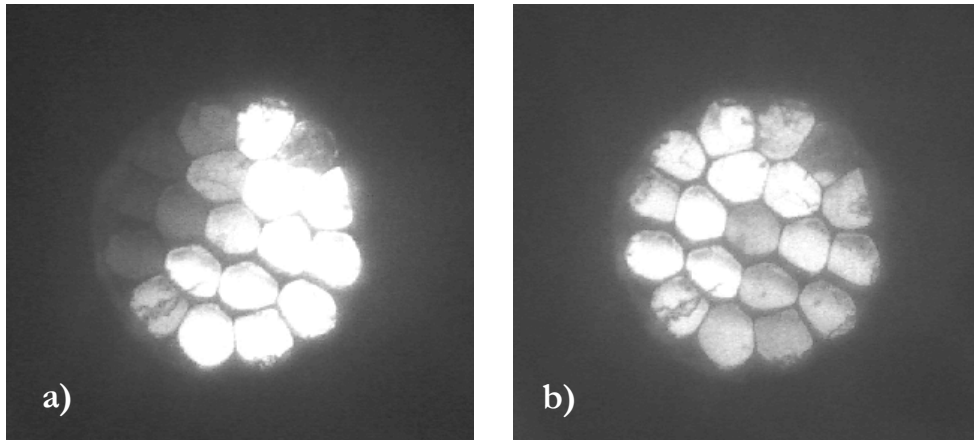


Figura 4.5: Distribución de potencia de campo cercano para una MC-POF de 19 núcleos. a) Inyección directa con un láser altamente elíptico, b) Inyección uniforme con un tramo corto de SC-POF.

En la Figura 4.5 la imagen de la izquierda muestra como parte de los núcleos de la fibra no se han iluminado, mientras que otros tienen una gran potencia luminosa. A la derecha, los núcleos están más uniformemente iluminados.

En función de la inyección, la potencia que se transporta en cada núcleo es distinta por lo tanto cabe esperar que el ancho de banda se modifique. Este efecto será tenido en cuenta a la hora de realizar la caracterización del ancho de banda de la fibra SMCK-1000, de forma que se considerarán varias configuraciones en las que se variarán las condiciones de inyección.

Distribución de potencia de campo lejano

Otro experimento de control que se realizó, fue medir la distribución de potencia de campo lejano simultáneamente para cada longitud considerada con ambos métodos de inyección. El patrón de campo lejano (FFP) es la distribución espacial de potencia óptica en función de los ángulos de salida a una distancia suficientemente alejada de la fibra. Para ello se utilizó un sistema de medida que captura la imagen de la proyección sobre una pantalla de la luz emitida a la salida del tramo de fibra [25]. En la Figura 4.6 podemos apreciar la diferencia entre la inyección directa y la inyección con un tramo corto de SC-POF.

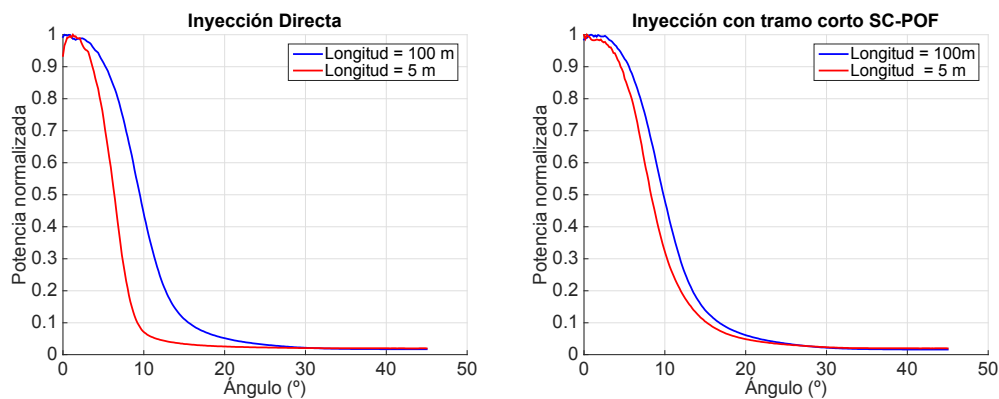


Figura 4.6: Distribuciones de potencia de campo lejano para una MC-POF de 19 núcleos. a) Inyección directa con láser altamente elíptico, b) Inyección uniforme mediante un tramo corto de SC-POF.

Como se puede observar, con la inyección directa, el perfil radial es más estrecho con longitudes cortas que largas. Sin embargo cuando la inyección es homogénea las distribuciones de potencia se uniformizan pareciéndose más a la distribución de potencia para longitudes largas. Estas medidas permiten verificar que la inyección a través del tramo corto de SC-POF hace que el rango de ángulos de entrada de la luz a la fibra bajo test sea mayor.

La consecuencia previsible de la presencia de modos de orden alto en la entrada de la MC-POF es un aumento de la dispersión modal en la fibra, lo que provocará una disminución del ancho de banda con respecto al caso de inyección directa.

Desalineamientos y ancho de banda

Los resultados anteriores hacen prever una disminución del ancho de banda cuando la inyección se realiza a través de un tramo corto de SC-POF, sin embargo existe una ventaja importante por el hecho de inyectar la luz por todos los núcleos. Si el acoplo emisor-fibra está afectado por desalineamientos y la iluminación de los núcleos no es uniforme, es posible que un desalineamiento a priori pequeño introduzca una fuerte degradación en las prestaciones del sistema. Este es un efecto particular de las MC-POF y es consecuencia directa del casi inexistente acoplo entre la luz transportada por los diferentes núcleos.

Los efectos sobre el ancho de banda de los desalineamientos longitudinal y transversal para un tramo MC-POF de 25 m se pueden observar en la Figura 4.7 y la Figura 4.8, respectivamente. Se representa también la potencia óptica medida simultáneamente en detección que nos da una idea de la cantidad de luz que ha sido filtrada espacialmente en desalineamiento.

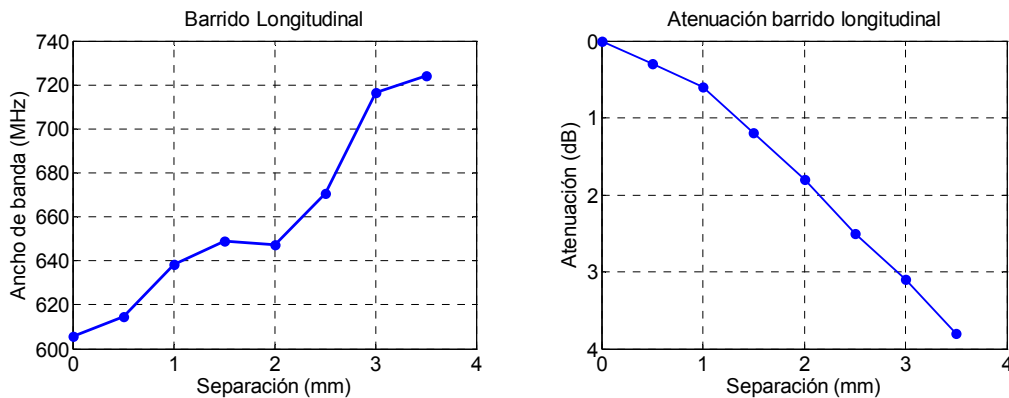


Figura 4.7: Desalineamiento longitudinal entre una SC-POF como inyectora y una MC-POF de 25m. a) Ancho de banda, b) atenuación en la potencia óptica recibida al final de la MC-POF.

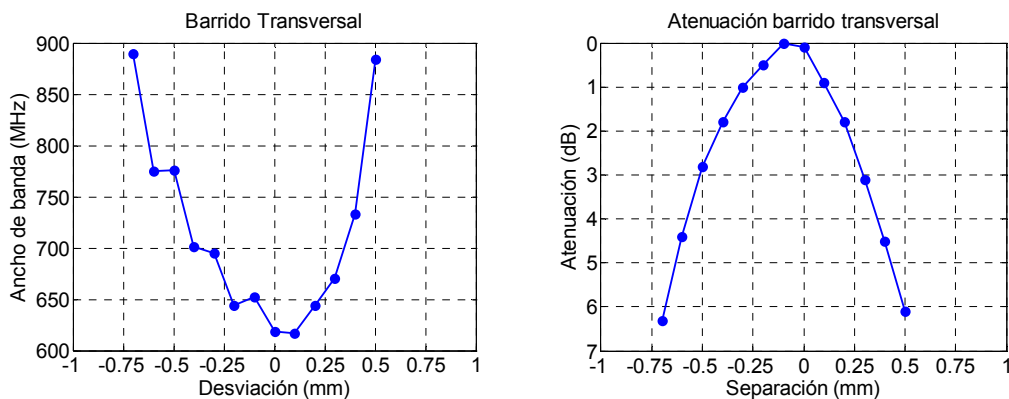


Figura 4.8: Desalineamiento transversal entre una SC-POF como inyectora y una MC-POF de 25m. a) Ancho de banda, b) atenuación en la potencia óptica recibida al final de la MC-POF.

Si observamos el barrido longitudinal en la Figura 4.7, podemos apreciar como el ancho de banda aumenta alrededor de 110 MHz cuando nos encontramos a una distancia de 3 mm de separación y la potencia se ha reducido a la mitad. Por lo tanto un filtrado espacial en la inyección es beneficioso para el ancho de banda

De la misma manera, el ancho de banda sufre una mayor variación cuando nos separamos transversalmente como se observa en la Figura 4.8. En este caso cuando la potencia se redujo a la mitad, el ancho de banda aumentó 158 MHz, lo que ocurre para un valor de desalineamiento de aproximadamente 0.4 mm. Es importante recalcar que el diámetro de la fibra es de 1 mm, por lo tanto en este caso la inyección sólo se está realizando en la mitad de núcleos aproximadamente. Estos resultados son consistentes con el hecho de que, cuando hay un menor número de núcleos que transmiten potencia, el ancho de banda de la fibra aumenta. Si suponemos que cada núcleo tiene unas propiedades ópticas (índice de refracción) y geométricas (tamaño, forma, etc.) ligeramente diferentes a la de sus vecinos, la contribución de luz transmitida por todos los núcleos incrementará la dispersión reduciendo el ancho de banda de la fibra. De esta forma, al desalinear la fibra e inyectar por menos núcleos, se está realizando un filtrado que reduce la dispersión.

Todos los efectos detectados en los estudios anteriores se tendrán en cuenta a la hora de caracterizar la MC-POF.

4.2.2. Ancho de banda en función de la longitud

En función de las observaciones anteriores, se decidió realizar la caracterización del ancho de banda con dos formas de inyección para no perder ningún tipo de información que pudiese ser relevante para estudios futuros.

La caracterización del ancho de banda de la MC-POF se ha realizado mediante el denominado **método de corte** (método *cutback*). Éste consiste en comenzar las medidas con un tramo de fibra largo y sucesivamente ir obteniendo el parámetro de interés acortando el tramo de fibra considerado.

En nuestro caso, para conseguir la mayor combinación posible de resultados, se decidió mantener un extremo de la fibra siempre con el mismo conector. El extremo opuesto, en el que se realizaron los cortes, se conectorizó cada vez que se realizó un corte. Por otra parte, vista la importancia de la inyección, se realizó una medida de la fibra directamente conectada al emisor y al detector. Otra medida de la fibra se realizó con un tramo corto de SC-POF conectorizado y acoplado al emisor. Esa misma medida se repitió con el tramo corto de SC-POF conectado al detector. En ambos casos se utilizó un doble conector para interconectar ambas fibras. Todas las medidas se realizaron por los dos extremos, de forma que, tenemos 6 configuraciones distintas con sus respectivos resultados. El esquemático de las configuraciones propuestas se puede observar en la Figura 4.9.

El *lado 1* del carrete de fibra indicado en la Figura 4.9, hace referencia al conector que no cambiará durante todo el proceso.

El proceso de caracterización se realizó de manera secuencial, midiendo para cada longitud y con las seis configuraciones, el parámetro S_{21} , la fase y el retardo de grupo. Para estudiar la atenuación de la fibra, del tramo corto de SC-POF y de los dobles conectores, se midió también la potencia óptica para todas las combinaciones con un medidor especializado *FOTEC* cuyas especificaciones se encuentran en el *Anexo I*.

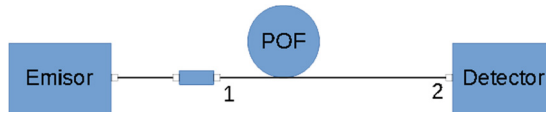
Configuración 1



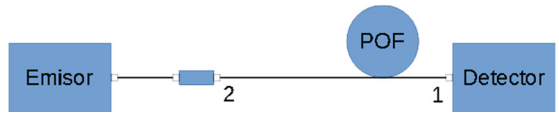
Configuración 2



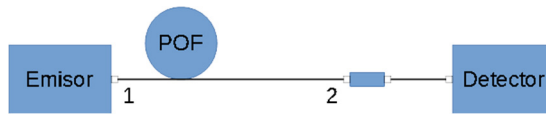
Configuración 3



Configuración 4



Configuración 5



Configuración 6

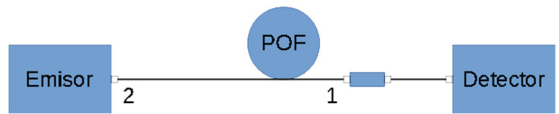


Figura 4.9: Configuraciones de conexión de la MC-POF en el sistema de medida. arriba) configuraciones 1 y 2 con conexión directa al emisor/detector; centro) configuraciones 3 y 4 con tramo corto de SC-POF en la inyección; abajo) configuraciones 5 y 6 con tramo corto de SC-POF en la detección.

Además para completar las medidas se realizó una medida de la distribución de potencia de campo lejano [25] para cada longitud. En el *Anexo II* se muestran algunos ejemplos de los FFT.

Resultados de las mediciones

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, los resultados de ancho de banda en función de la longitud para la MC-POF SMCK-1000, son los mostrados en la Figura 4.10.

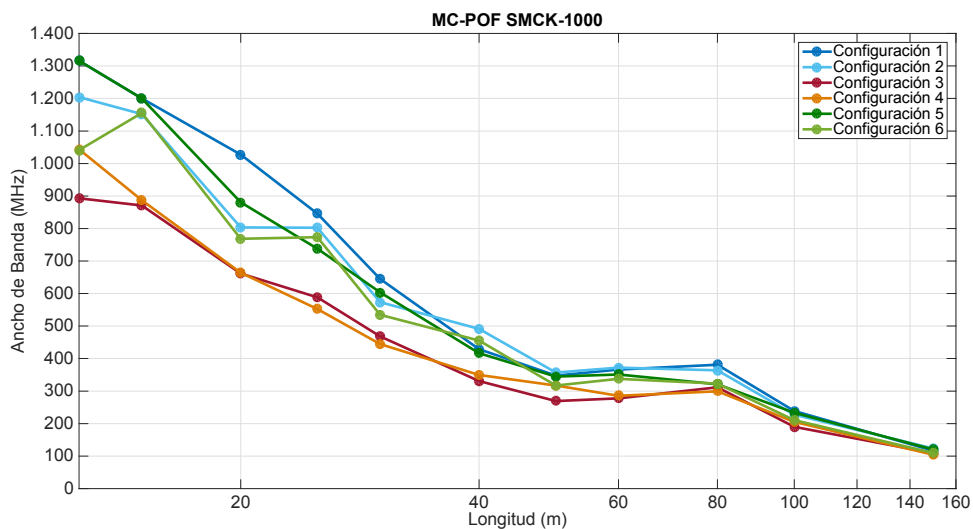


Figura 4.10: Resultados de ancho de banda para la MC-POF SMCK-1000, con las 6 configuraciones propuestas.

Para interpretar los resultados, nos podemos centrar en dos grupos de medidas. Como se indica en el esquema de configuraciones de la Figura 4.9, la configuración 1, la configuración 3 y la configuración 5 mantienen el mismo conector para todas las longitudes y además es por este extremo por el que se hace la inyección. En este grupo tendremos resultados con idéntico extremo en la inyección.

La configuración 2, la configuración 4 y la configuración 6 varían el conector por el que se inyecta la luz para cada longitud. En este grupo la inyección variará para cada longitud y mantendremos constante el extremo de la detección.

Extremo de inyección fijo

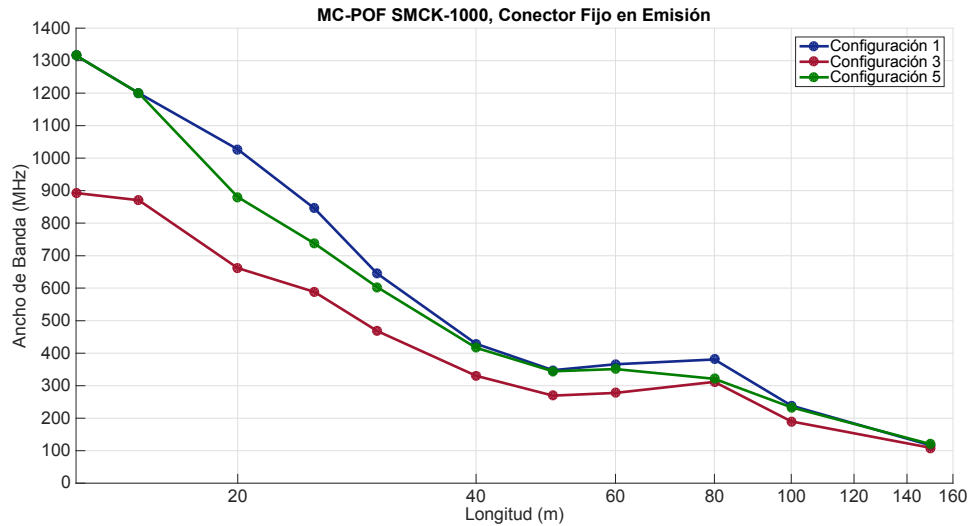


Figura 4.11: Ancho de banda de la fibra SMCK-1000 para las configuraciones 1, 3 y 5.

En la Figura 4.11 podemos observar el efecto del tramo corto de SC-POF. Cuando la luz es inyectada a la MC-POF de forma homogénea (Configuración 3) el ancho de banda se reduce de manera muy significativa, haciéndose este efecto mucho más pronunciado en longitudes de fibra cortas. Por ejemplo en 20 m el ancho de banda se reduce 365 MHz, mientras que en 100 m el ancho de banda solo se diferencia 43.8 MHz.

Este efecto se esperaba tras los resultados y conclusiones obtenidos en el apartado 4.2.1 *Estudios Previos*. Esto se debe a que con el tramo corto de SC-POF en el emisor se inyecta la luz con una mayor apertura (en ángulos más altos) por lo que los efectos de la dispersión modal son mayores y por tanto disminuye el ancho de banda. Además este efecto es mayor para fibras cortas que para fibras largas donde la difusión realiza el mismo efecto de forma distribuida (es decir, que la luz se va difundiendo poco a poco a ángulos mayores).

Por otra parte cuando el tramo corto de SC-POF se sitúa antes del detector (Configuración 5), el ancho de banda disminuye con respecto a la medida sin tramo corto (Configuración 1), aunque la diferencia en general es muy pequeña. Estos resultados son consecuentes con un efecto de acoplo modal o mezclado de modos (ángulos) que hace que disminuya ligeramente el ancho de banda ya que la potencia transmitida en modos/ángulos altos (con mayor retardo/dispersión) puede pasar a modos/ángulos bajos que se detectan, en lugar de filtrarse por efecto del área del detector como ocurre en el caso de la detección directa.

Extremo de detección fijo

Para este grupo de medidas observamos en la Figura 4.12 que como en el grupo anterior, el ancho de banda siempre es mayor cuando no tenemos un tramo de fibra que homogenice la inyección o la detección.

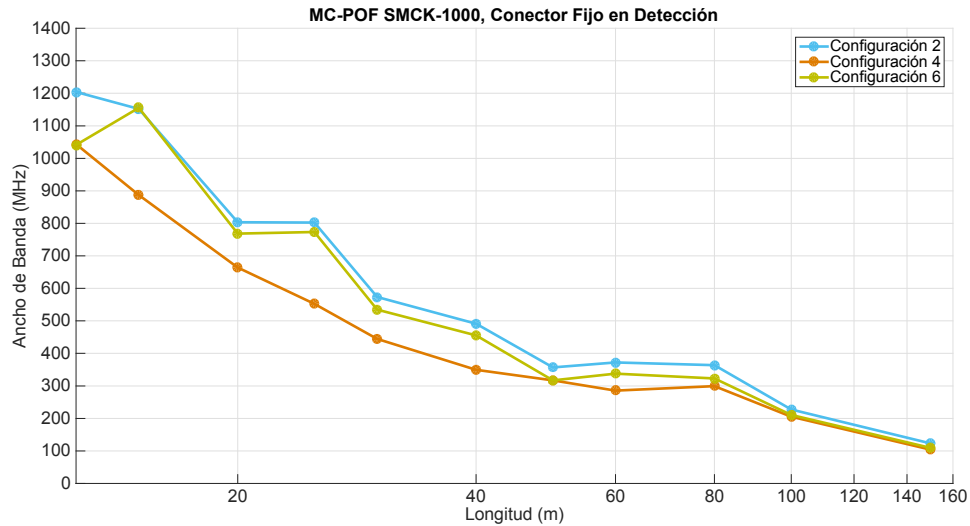


Figura 4.12: Ancho de banda de la fibra SMCK-1000 para las configuraciones 2, 4 y 6.

Por otra parte el hecho de que el conector cambie en la inyección para cada medida, no implica que no se repitan los mismos patrones que aparecían en el grupo de medidas representadas en la Figura 4.11 (la Configuración 2 es mayor que la 6 y la Configuración 4 es mucho menor que las anteriores). Sin embargo se observa como en las Configuraciones 2 y 4, con inyección directa, el cambio de conector produce que la variación con la longitud sea menos suave que para la Configuración 1 y 3.

En cuanto a las diferencias entre los dos grupos de medidas, cambiando el lado de inyección, las principales diferencias son locales para una distancia y dependen de la preparación del conector que varía en cada corte. En las Figuras Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15 se muestran las principales diferencias en ancho de banda y en atenuación, promediando las medidas de ambos lados con las mismas condiciones.

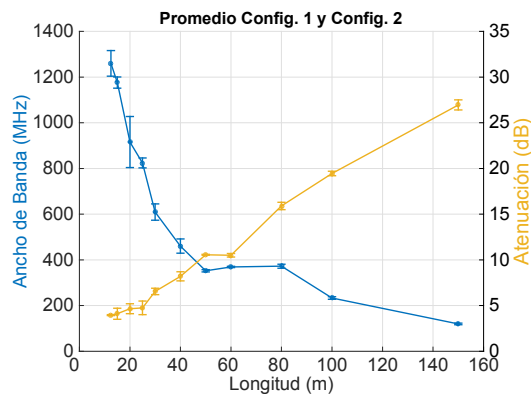


Figura 4.13: Variabilidad entre la configuración 1 y 2 (conexión directa) del ancho de banda y de la atenuación de la fibra.

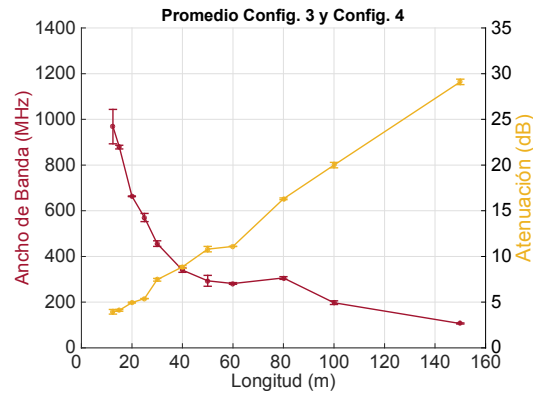


Figura 4.14: Variabilidad entre la configuración 3 y 4 (SC-POF en inyección) del ancho de banda y de la atenuación de la fibra.

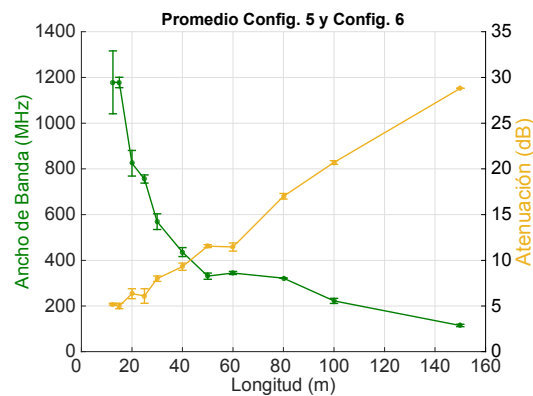


Figura 4.15: Variabilidad entre la configuración 5 y 6 (SC-POF en detección) del ancho de banda y de la atenuación de la fibra.

Observando las barras de error en las anteriores figuras, se aprecia que la variabilidad más grande entre lados, se produce en longitudes cortas, mientras que esta variabilidad es menos acentuada en longitudes grandes. Esto se debe a que en las longitudes largas se produce una transferencia de potencia de los modos y el efecto de los cortes y conectores queda más oculto.

En cuanto a la atenuación de la fibra, en las longitudes largas donde la variabilidad es menor, es de 0.178 dB/m (@650 nm). Como se puede observar el efecto del doble conector y del tramo corto de MC-POF en la potencia óptica es muy pequeño con valores máximos de 2 dB. En las curvas de atenuación anteriores se aprecia como la atenuación es muy similar en todos los casos.

Con los presentes resultados quedan caracterizados los anchos de banda para la fibra SMCK-1000. Sin embargo tal y como hemos definido el ancho de banda a 3 dB, no podemos asegurar que la máxima tasa de transmisión se encuentre en ese punto. Para conocer las limitaciones en las prestaciones de un enlace POF real es preciso obtener la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) en función de la tasa de transmisión. Por ejemplo para la longitud de 50 m de SMCK el ancho de banda en las mejores condiciones es de 352 MHz sin embargo la máxima tasa de transmisión considerando un criterio de BER de 10^{-6} es de unos 600 Mb/s. El estudio de la tasa de transmisión junto con los diagramas de ojo se puede observar en el *Anexo III*.

Finalmente en la Figura 4.16, se comparan los resultados de ancho de banda de la MC-POF caracterizada mediante el método de corte en este trabajo, con otros fragmentos de SC-POF de diferentes marcas. Todas las medidas han sido realizadas con el sistema de medida propuesto en este trabajo, por lo que las condiciones de inyección y detección son las mismas.

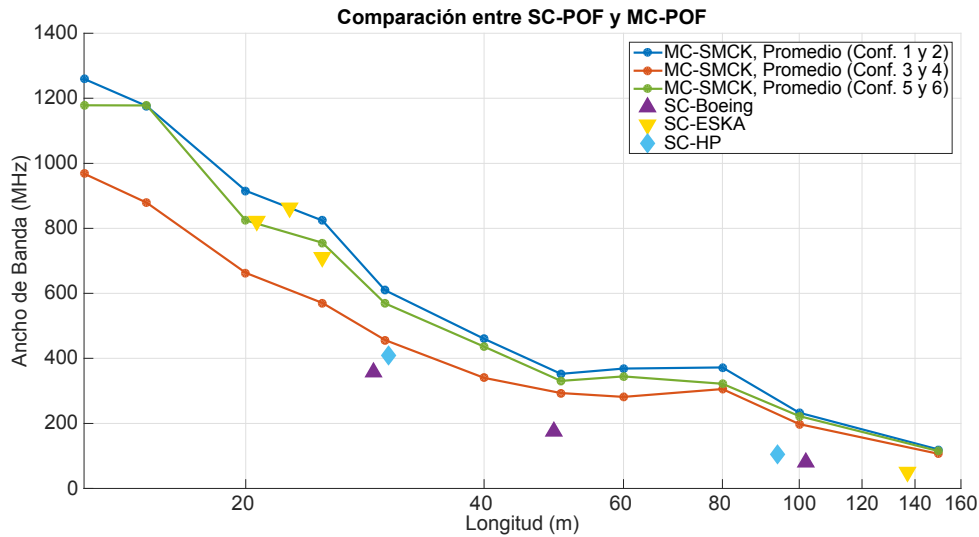


Figura 4.16: Comparación de ancho de banda de la MC-POF SMCK-1000 y varias SC-POF. Todas las medidas han sido realizadas con el sistema presentado en este trabajo (VNA).

A la vista de los resultados, las SC-POF de HP (HFBR-RUS500) y la proporcionada por Boeing presentan anchos de banda menores que la MC-POF para cualquiera de las condiciones de inyección. Sin embargo, la SC-POF de Mitsubishi (ESKA PREMIER GH4001) presenta un comportamiento diferente respecto al resto. En esta fibra para longitudes pequeñas los anchos de banda se asemejan a los de la MC-POF con inyección directa o con tramo corto de SC-POF en el detector, sin embargo para longitudes largas el ancho de banda se mantiene en la línea del resto de SC-POF.

5. Conclusiones y líneas futuras

El principal objetivo del presente trabajo ha consistido en desarrollar un sistema de caracterización de la respuesta frecuencial de fibras ópticas de plástico basado en un analizador de redes vectorial. El parámetro que extraeremos de esta respuesta frecuencial es el ancho de banda, que es de gran interés en aplicaciones de la POF en el campo de las comunicaciones. Así mismo, se ha realizado la caracterización del ancho de banda de una fibra POF de múltiples núcleos comercial, comparándose los resultados obtenidos con los de algunas SC-POF también comerciales. A continuación se exponen las conclusiones extraídas de este trabajo y las posibles líneas futuras que surgen de su realización.

5.1. Conclusiones

Para el diseño del montaje experimental se seleccionaron los dispositivos comerciales más apropiados para constituir un enlace POF con la tecnología actual. En concreto, como componentes ópticos se eligieron un diodo láser rojo de potencia de emisión moderada y un fotodetector de área relativamente grande, realizándose la conectorización de ambos componentes a la fibra mediante conectores ST de 1 mm. La temperatura y la corriente de polarización del láser han sido controladas de tal manera que siempre se ha operado con el láser en zona lineal. Por otra parte, la comunicación con el analizador de redes vectorial ha sido posible gracias a los *drivers* proporcionados por Agilent, que han hecho posible el manejo y la recopilación de datos mediante programación en el entorno de MatLab. El modelo de Analizador de Redes Vectorial elegido presenta un rango dinámico muy amplio lo que ha permitido realizar medidas en fibras ópticas de 150 m en las que el nivel de potencia es muy bajo. Por otra parte el conjunto detector - amplificador nos han permitido realizar medidas en fibras cortas de hasta 12.5 m.

En cuanto al sistema *software* de medida, se ha perseguido la sencillez, de forma que pueda ser manejado por un usuario a alto nivel. Para ello se ha desarrollado un interfaz gráfico muy amigable que se encarga de obtener y procesar automáticamente la información del analizador de redes vectorial. Este punto es especialmente importante para el grupo de trabajo en fibra óptica de plástico, porque permite almacenar y organizar toda la información que se genera en cada medida lo que resultará de gran utilidad en futuros estudios.

El sistema de medida ha sido verificado comparando los resultados del ancho de banda en fibras de un único núcleo con otros sistemas desarrollados en proyectos anteriores. Además se ha comprobado la importancia de los parámetros que configuran la detección, existiendo una fuerte dependencia entre el ancho de banda y la geometría entre la fibra y el detector. En este sentido, la introducción de un filtrado espacial de la distribución modal de potencia óptica a la salida de la fibra permite mejorar el ancho de banda. Sin embargo, otra consecuencia directa de este filtrado espacial es el aumento de la atenuación del enlace, de forma que deberá encontrarse un compromiso para optimizar las prestaciones del sistema. Algunos de los parámetros que afectan a la cantidad de filtrado espacial aplicado, son el área del detector y la distancia fibra-conector, determinada principalmente por el tipo de conector usado. Para cada enlace particular, será necesario configurar estos dos parámetros de forma adecuada teniendo en cuenta el balance de potencias o *power budget* y la tasa de transmisión deseada. En la caracterización de fibras SC-POF también se analizó el efecto de la longitud del enlace sobre el ancho de banda. En este sentido, se observó que en fibras cortas (del orden de 10 a 25 m) existe una fuerte disminución del ancho de banda al aumentar la longitud,

atenuándose esta disminución en fibras largas, las cuales estarán habitualmente limitadas en potencia.

Una vez verificado el funcionamiento del sistema se ha realizado la caracterización frecuencial de una fibra óptica de múltiples núcleos usando el método de corte, lo que nos ha permitido obtener su ancho de banda para distintas longitudes. La fibra considerada es un modelo comercial de la compañía Asahi KASEI y contiene 19 núcleos. Estudios preliminares del grupo demuestran el casi inexistente acoplo de potencia entre núcleos es este tipo de fibras, si bien hasta la fecha no se conoce exactamente el comportamiento de los múltiples núcleos y las relaciones que existen entre ellos. Por lo tanto se han llevado a cabo experimentos de control que permitiesen verificar en qué condiciones debía de ser caracterizado el ancho de banda fibras MC-POF.

En los experimentos de control realizados se pudo comprobar la fuerte dependencia existente entre el ancho de banda y las condiciones de inyección, siendo mucho más desfavorable una inyección homogénea que heterogénea entre los núcleos. Alternativamente también se verificó la dependencia entre las curvaturas y el ancho de banda, comprobándose de una manera menos controlada, como el ancho de banda no se veía afectado por éstas. Los radios de curvatura considerados fueron relativamente grandes (del orden de 1 cm), el efecto de curvaturas más pequeñas deberá ser realizado con más detalle y permitirá comprobar la presumible escasa degradación que éstas introducen en las propiedades de propagación de las MC-POF.

Los efectos detectados en los experimentos de control sirvieron para establecer las condiciones de medida del ancho de banda en MC-POF. El protocolo de medida diseñado permitió obtener la variabilidad del ancho de banda con la preparación de los extremos de la fibra, así como la dependencia con las condiciones de inyección. Los datos extraídos en cada medida incluyen módulo y fase de la respuesta frecuencial, retardo de grupo, perfil radial de campo lejano y potencia óptica en los extremos de inyección y detección. Como conclusión global de las distintas condiciones de inyección consideradas, es posible afirmar que el ancho de banda en fibras de múltiples núcleos es mejor con una inyección no uniforme en la que la potencia inyectada y guiada por algunos de los núcleos es sensiblemente mayor que la inyectada y guiada por otros.

Por último, el análisis comparativo de los anchos de banda de fibras de un solo núcleo y fibras de múltiples núcleos arroja como conclusión principal que la MC-POF presenta mejores características que los tres modelos de SC-POF considerados. Sin embargo, no se puede asegurar que esto vaya a cumplirse de forma general, ya que se han observado grandes variaciones para los tres tipos de fibras analizados. En concreto, la fibra ESKA PREMIER GH4001 de Mitsubishi presenta valores de ancho de banda muy similares a la SMCK-1000 para longitudes en torno a 25 – 30 m. Por lo tanto la principal ventaja que presentan las fibras de múltiples núcleos es la resistencia que ofrecen frente a curvaturas, lo cual se ha comprobado experimentalmente en este trabajo. La cuantificación del efecto de las curvaturas sobre las características de propagación de las MC-POF, básicamente atenuación y ancho de banda, requerirá de un análisis más exhaustivo que queda fuera del alcance de este proyecto.

5.2. Líneas futuras

El sistema de medida, los resultados generados y algunos efectos descubiertos en las MC-POF durante el desarrollo de este trabajo dejan abiertas varias líneas de investigación centradas en la descripción de las propiedades físicas de las MC-POF. Algunos de estas líneas se centran en:

- Realizar un modelado numérico de las MC-POF con todos los datos generados en el proceso de caracterización del ancho de banda. Este modelo será de gran utilidad en

sistemas de simulación que hasta la fecha no incorporan en sus librerías fibras ópticas de este estilo.

- Realizar un estudio preciso de las curvaturas y su influencia en el ancho de banda en las MC-POF que permita resaltar la ventaja competitiva de las MC-POF frente a las SC-POF.
- Realizar un estudio de las propiedades físicas de las MC-POF, por ejemplo ancho de banda, patrón de campo lejano... en longitudes de fibra superiores a las realizadas en este trabajo. Para ello será necesario disponer de un diodo láser cuya emisión se encuentre en la banda de mínima atenuación de las MC-POF, para el modelo SMCK-1000 de Asahi KASEI será necesario un láser que emita en el espectro del verde.
- Caracterizar el ancho de banda de cada núcleo de una MC-POF inyectando luz en núcleos individuales, mediante una fibra de vidrio mono-modo en el visible, con una lente colimadora ajustada a tal efecto.
- Evaluar la posibilidad de la técnica de multiplexación espacial en fibras MC-POF teniendo en cuenta la interferencia o *crossstalk* de los datos transportados por los distintos núcleos y las prestaciones de la transmisión de cada uno de ellos.

Además el sistema de medida desarrollado, puede ser utilizado por futuros estudiantes para analizar el ancho de banda en fibras de plástico, obteniendo resultados en tiempo real.

5.3. Valoración del proyecto

El proyecto presentado en esta memoria se ha realizado siguiendo los objetivos marcados al inicio de éste y solventando las dificultades que iban surgiendo. Algunas de estas dificultades se han debido a las características de los dispositivos utilizados, por ejemplo las reflexiones debidas a la mala adaptación de impedancias en la base moduladora.

Durante el desarrollo de este proyecto he afianzado conceptos adquiridos en la carrera y relacionados con varias áreas del conocimiento, desde las comunicaciones ópticas, el manejo de instrumentación electrónica, las señales de Radio Frecuencia hasta el desarrollo de un interfaz gráfico.

En mi opinión los trabajos de investigación y desarrollo son muy interesantes para la finalización de los estudios formativos, porque son muy satisfactorios a nivel personal, ya que haciendo uso de los conocimientos adquiridos se pueden lograr grandes resultados.

6. Referencias

- [1] 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, no.:20, pp. 9028-9035, 2006.
- [2] M. A. Losada, J. Mateo, y J. J. Martínez-Muro, «Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model», *J. Opt.*, vol. 13, n.º 5, p. 055406, 2011.
- [3] J. Mateo, M. A. Losada, y A. López, «Application of the plastic optical fibre in domestic multimedia networks», en *Proceeding of the 3rd International Conference on Transparent Optical Networks - Mediterranean Winter Conference (ICTON-MW)*, 2009.
- [4] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Arrue, J. Zubia, y D. Kalymnios, «High NA POF Dependence of Bandwidth on Fibre Length», en *Proceedings of the 12th International Conference on Plastic Optical Fibers and Application (IC-POF). Seattle (EE.UU.)*, 2003.
- [5] M. A. Losada, J. Mateo, D. Espinosa, I. Garcés, y J. Zubia, «Characterisation of the far field pattern for plastic optical fibres», en *Proceedings of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers and Applications (IC-POF). Nürnberg (Alemania)*, 2004.
- [6] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Zubia, U. De Zaragoza, y P. Vasco, «Bandwidth measurement in POF based on general purpose equipment», en *Proceedings of the 14th International Conference on Plastic Optical Fibers and Applications (IC-POF). Hong Kong (China)*, 2005.
- [7] A. López, M. A. Losada, J. Mateo, y J. Zubia, «Simulation framework for POF-based communication systems», en *Proceedings of 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Budapest (Hungria)*, 2015.
- [8] J. Mateo, M. A. Losada, y J. Zubia, «Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation.», *Opt. Express*, vol. 17, n.º 4, pp. 2850-2860, 2009.
- [9] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, y N. Madamopoulos, «Modeling methodology for engineering SI-POF and connectors in an avionics system», *J. Light. Technol.*, vol. 31, n.º 3, pp. 468-475, 2013.
- [10] K. C. Kao y G. A. Hockham, «Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies», *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 113, n.º 7, p. 1151, 1966.
- [11] Y. Koike, E. Nihel, N. Tanio, y Y. Ohtsuka, «Graded-index plastic optical fiber composed of methyl methacrylate and vinyl phenylacetate copolymers.», *Appl. Opt.*, vol. 29, n.º 18, pp. 2686-2691, 1990.
- [12] Y. Koike, «High-bandwidth graded-index polymer optical fibre», *Polym.*, vol. 32, n.º 10, pp. 1737-1745, 1991.
- [13] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, y W. Daum, *POF Handbook*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

- [14] D. Hess, «Nexans Demonstrates Gigabit Ethernet Over Extended Distances on Plastic Optical Fiber», en *Internet Nexans, presentation*, 2004.
- [15] J. Arrue, J. Zubia, G. Durana, y J. Mateo, «Parameters affecting bending losses in graded-index polymer optical fibers», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 7, n.º 5, pp. 836-844, 2001.
- [16] J. Mateo, I. Garcés, y M. A. Losada, *Dispositivos y Sistemas de Transmisión Óptica*. 2013.
- [17] E. Snitzer, «Cylindrical Dielectric Waveguides Modes», *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 51, n.º 5, pp. 491-498, 1961.
- [18] J. Zubia y J. Arrue, «Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications», *Opt. Fiber Technol.*, vol. 7, n.º 2, pp. 101-140, 2001.
- [19] A. López, «Optical and Microwave Data Transmission Systems for Last Mile, Fiber to the Home FTTH, In house Networks, LAN- and MAN- Applications», en *Optical Communications and Related Microwave Techniques*, Ed. O. Str., J. W. & Sons, Ed. 2015.
- [20] A. Berganza Valmala, «Estudio y Caracterización de las Fibras Ópticas de Plástico Multinúcleo», Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, 2013.
- [21] A. K. E. Corporation, «High-Performance Plastic Optical Fiber. Luminous POF.»
- [22] B. Rosinski, J. W. D. Chi, P. Grosso, y J. Le Bihan, «Multichannel transmission of a multicore fiber coupled with vertical-cavity surface-emitting lasers», *J. Light. Technol.*, vol. 17, n.º 5, pp. 807-810, 1999.
- [23] J. J. Martínez Muro, «Desarrollo de sistemas de medida de ancho de banda en fibra óptica de plástico: estudio comparativo.», PFC, Universidad de Zaragoza, 2005.
- [24] P. Pérez Vela, «Desarrollo de un Sistema Automatizado de medida del ancho de banda de fibras ópticas mediante barrido en frecuencia», PFC, Universidad de Zaragoza, 2002.
- [25] A. Esteban Sánchez, «Análisis de los efectos de conectores sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico», PFC, Universidad de Zaragoza, 2011.
- [26] Japanese Industrial Standard, «Test methods for bandwidth of multimode optical fibres.» Japan, p. JIS C 6824, 1989.
- [27] S. Takahashi y K. Ichimura, «Time domain measurements of launching-condition-dependent bandwidth of all-plastic optical fibres», *Electron. Lett.*, vol. 17, n.º 3, pp. 217-219, 1991.
- [28] Agilent Technologies, «Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis: App Note.» 2012.
- [29] Agilent Technologies, «Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers», *Mil. Commun. Radars*, vol. 2nd Editio, pp. 1-86, 2006.
- [30] KEYSIGHT TECHNOLOGIES, «IO Libraries Suite.» [En línea]. Disponible en: <http://www.keysight.com/en/pd-1985909/io-libraries-suite?&cc=ES&lc=eng>. [Accedido: 17-jun-2015].

- [31] IVI FOUNDATION, «IVI FOUNDATION.» [En línea]. Disponible en: <http://ivifoundation.org/>. [Accedido: 17-jun-2015].
- [32] I. Foundation, *Your Guide to Getting Started with IVI Drivers*. 2012.
- [33] MathWorks, «Instrument Control Toobox», *Instrument Control Toolbox*. [En línea]. Disponible en: <http://es.mathworks.com/help/instrument/index.html>. [Accedido: 17-jun-2015].
- [34] MathWorks, «MatLab GUI.» [En línea]. Disponible en: http://uk.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html?s_tid=gn_loc_drop. [Accedido: 17-jun-2015].
- [35] G. Jiang, R. F. Shi, y A. F. Garito, «Mode coupling and equilibrium mode distribution conditions in plastic optical fibers», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 9, n.º 8, pp. 1128-1130, 1997.
- [36] O. Ziemann, C. A. Bunge, H. Poisel, y K. F. Klein, «Bandwidth of thick glass and polymer optical fibres», en *POF' 2004 Nuremberg*, 2004, pp. 140-146.
- [37] P. Heredia, J. Mateo, y M. A. Losada, «Transmission capabilities of large core GI-POF based on BER measurements», en *16th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application*, 2007, pp. 307-310.
- [38] M. A. Losada, J. Mateo, A. López, I. Salinas, D. Izquierdo, y I. Garcés, «Laboratorio de Comunicaciones Ópticas. Práctica 6: Obtención de BER y Diagrama de Ojo en POFs.» p. Anexo 3.

Anexo I – Hojas de características

En este anexo se adjuntan las especificaciones de los distintos dispositivos utilizados en el montaje experimental.

▼ TECHNOLOGY

Light

▼ CHAPTERS

Coherent Sources

Incoherent Sources

Covega

Drivers/Mounts

Accessories

▼ SECTIONS

Laser Diodes

Pigtailed Diodes

Fiber-Coupled
Laser Sources

WDM Laser Sources

HeNe Lasers

Laser Diode
Modules

Tunable
Lasers

Swept Source
Lasers

Terahertz

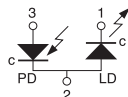
All laser diodes are extremely electrostatic sensitive; see page 1244 for our selection of antistatic products.


 $\lambda = 638 \text{ nm}$, $P = 40 \text{ mW}$, Single Mode Sanyo DL6148-030

CAUTION:
ELECTROSTATIC
SENSITIVE



Pin Description
1 laser cathode
2 common case
3 monitor diode anode



PIN CODE 5A

- Ø5.6 mm Package
- 60 mA (Typ.) Threshold Current
- Single Longitudinal Mode
- 2:1 Aspect Ratio (Typ.)

ITEM#	£* 1-5 PCS	€* 1-5 PCS	RMB* 1-5 PCS
DL6148-030	£ 164.20	€ 211.80	¥ 2,007.90

*For quantities over 5 pieces, please call our local office for pricing.

ITEM#	PRICE 1-5 PCS	PRICE 6-10 PCS	PRICE 11-20 PCS	DESCRIPTION
DL6148-030	\$ 237.90	\$ 214.11	\$ 190.32	Sanyo 638 nm, 40 mW

Maximum Ratings ($T_C = 25^\circ\text{C}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING
Optical Output Power (CW)	P_O	40 mW
LD Reverse Voltage	$V_{R(LD)}$	2 V
PD Reverse Voltage	$V_{R(PD)}$	30 V
Operation Case Temperature	T_C	-10 to 50°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to 85°C

Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $P = 40 \text{ mW}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX
Threshold Current	I_{th}	—	60 mA	85 mA
Operation Current	I_{op}	—	100 mA	130 mA
Operation Voltage	V_{op}	—	2.4 V	2.7 V
Lasing Wavelength	λ_P	635 nm	638 nm	645 nm
Beam Divergence	$\theta_{//}$	6.5°	8.5°	12°
(FWHM)	θ_{\perp}	12°	16°	22°
Monitor Current	I_m	0.3 mA	0.6 mA	0.9 mA

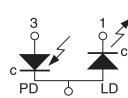
Note: All data is presented as typical unless otherwise specified.

 $\lambda = 650 \text{ nm}$, $P = 5 \text{ mW}$, Single Mode Sanyo DL3147-060

CAUTION:
ELECTROSTATIC
SENSITIVE



Pin Description
1 laser cathode
2 common case
3 monitor diode anode



PIN CODE 5A

- Ø5.6 mm Package
- 20 mA (Typ.) Threshold Current
- Operating Temperature of 70°C at 5 mW
- TE Mode

ITEM#	£* 1-5 PCS	€* 1-5 PCS	RMB* 1-5 PCS
DL3147-060	£ 7.80	€ 10.06	¥ 95.38

*For quantities over 5 pieces, please call a local office for pricing.

ITEM#	PRICE 1-5 PCS	PRICE 6-10 PCS	PRICE 11-20 PCS	DESCRIPTION
DL3147-060	\$ 11.30	\$ 9.95	\$ 7.58	Sanyo 650 nm, 5 mW

Absolute Maximum Ratings ($T_C = 25^\circ\text{C}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING
Optical Power Output (CW)	P_O	7 mW
LD Reverse Voltage	$V_{R(LD)}$	2 V
PD Reverse Voltage	$V_{R(PD)}$	30 V
Operating Temperature	T_{op}	-10 to 70°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to 85°C

Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $P = 5 \text{ mW}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX
Threshold Current	I_{th}	—	20 mA	35 mA
Operation Current	I_{op}	—	30 mA	45 mA
Operation Voltage	V_{op}	—	2.3 V	2.6 V
Lasing Wavelength	λ_P	645 nm	650 nm	660 nm
Beam Divergence	$\theta_{//}$	7°	8°	10°
(FWHM)	θ_{\perp}	25°	30°	35°
Monitor Current	I_m	0.08 mA	0.2 mA	0.4 mA
Astigmatism	A_s	—	8 μm	—

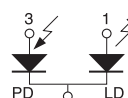
Note: All data is presented as typical unless otherwise specified.

 $\lambda = 654 \text{ nm}$, $P = 10 \text{ mW}$, Single Mode Sharp GH06510B2A

CAUTION:
ELECTROSTATIC
SENSITIVE



Pin Description
1 laser anode
2 common case
3 monitor diode anode



PIN CODE 5B

- Ø5.6 mm Package
- 40 mA (Typ.) Low Current Drive
- 10 mW Maximum Optical Power Output (CW)
- 70°C (Max) Operating Temperature

ITEM#	£* 1-5 PCS	€* 1-5 PCS	RMB* 1-5 PCS
GH06510B2A	£ 14.84	€ 19.14	¥ 181.46

*For quantities over 5 pieces, please call a local office for pricing.

ITEM#	PRICE 1-5 PCS	PRICE 6-10 PCS	PRICE 11-20 PCS	DESCRIPTION
GH06510B2A	\$ 21.50	\$ 20.43	\$ 17.20	Sharp 654 nm, 10 mW

Absolute Maximum Ratings ($T_C = 25^\circ\text{C}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING
Optical Power Output	P_O	10 mW
LD Reverse Voltage	$V_{R(LD)}$	2 V
PD Reverse Voltage	$V_{R(PD)}$	30 V
Operation Case Temperature	T_C	-10 to 70°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to 85°C
Soldering Temperature	T_{sld}	260 $^\circ\text{C}$

Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $P = 7 \text{ mW}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX
Threshold Current	I_{th}	—	30 mA	45 mA
Operation Current	I_{op}	—	40 mA	55 mA
Operation Voltage	V_{op}	—	2.2 V	2.5 V
Lasing Wavelength	λ_P	640 nm	654 nm	660 nm
Divergence Parallel	$\theta_{//}$	7°	8.5°	10°
Divergence Perpendicular	θ_{\perp}	24°	29°	33°
Monitor Current	I_m	0.08 mA	0.2 mA	0.4 mA

Note: All data is presented as typical unless otherwise specified.



LDM9T

Laser Mount with TEC and Controller

User Guide



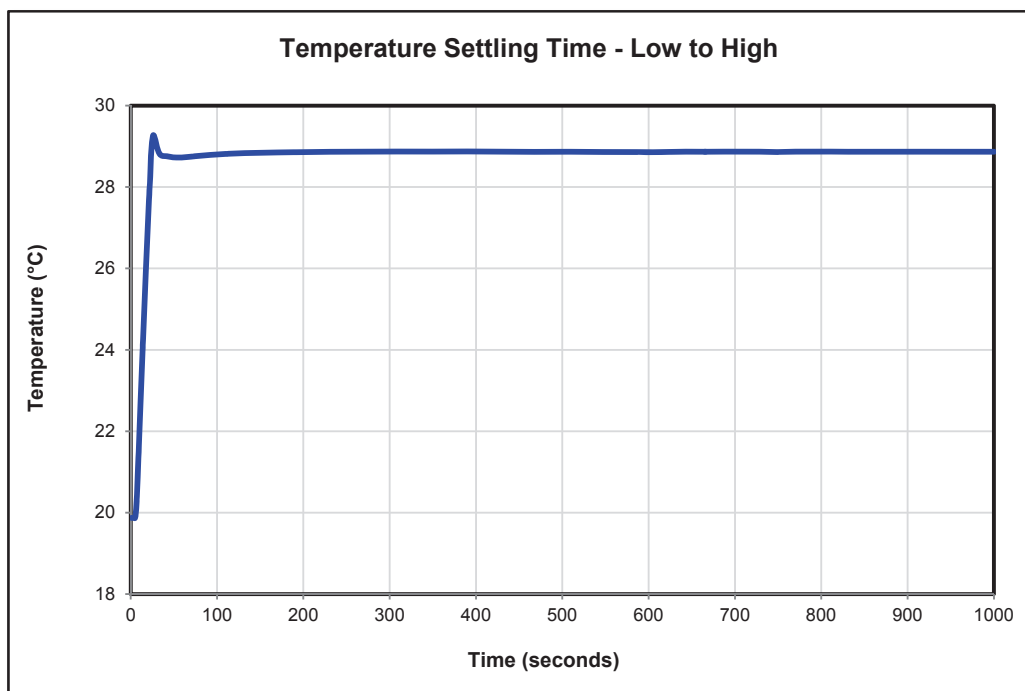
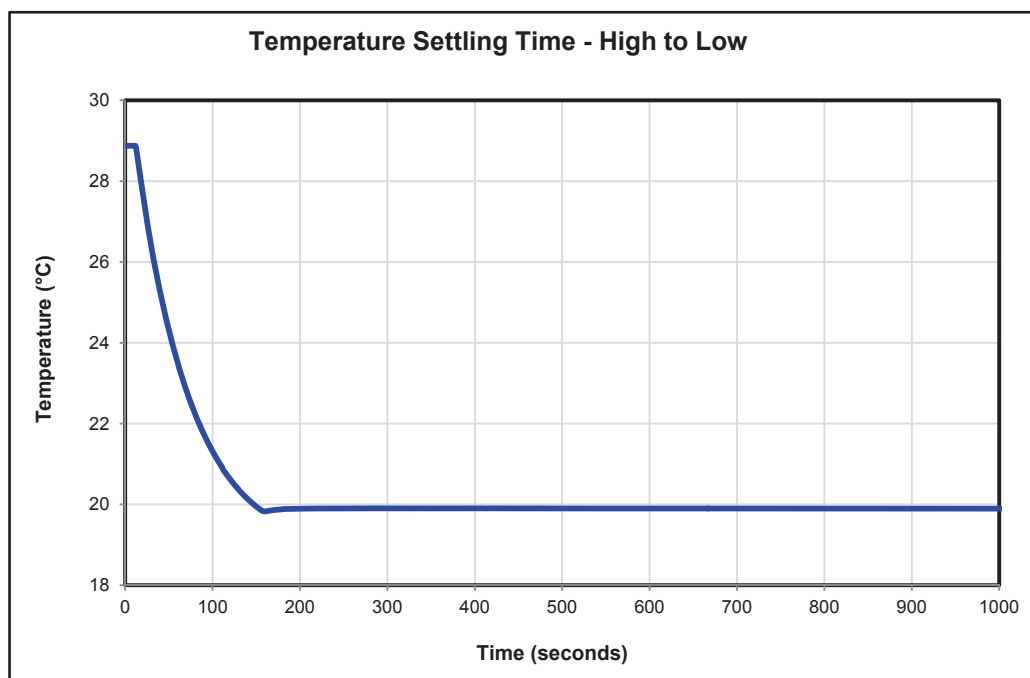
Chapter 8 Specifications

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

*Modulate Low Frequencies Through LD Controller

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

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

Typical Temperature Response TimesFigure 8 *Typical Heating Response*Figure 9 *Typical Cooling Response*

RF Modulation

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

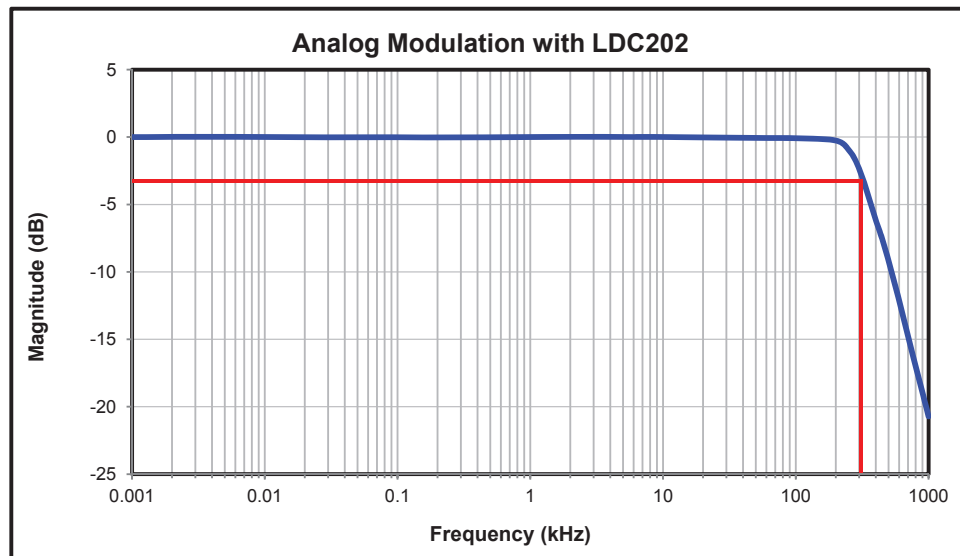


Figure 10 *Low Frequency Modulation Through LD Controller*

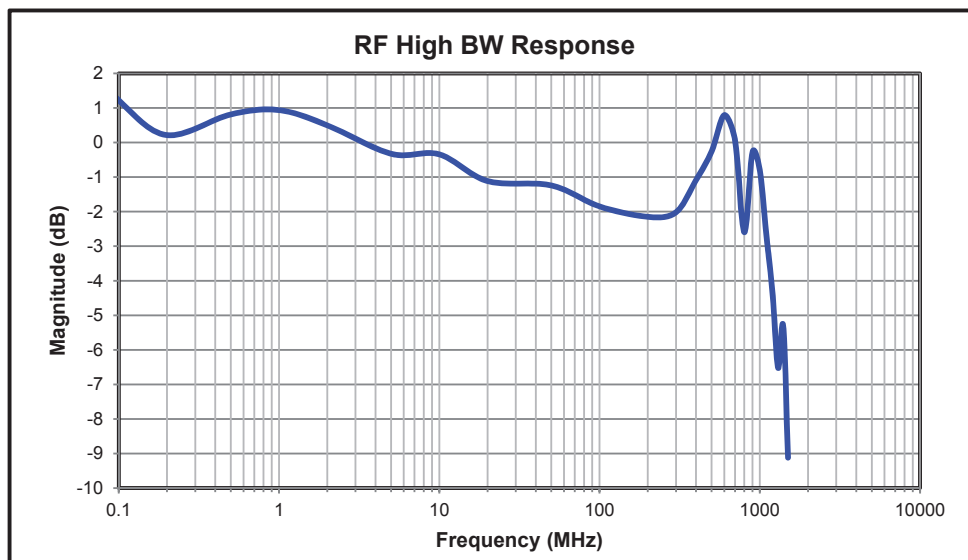
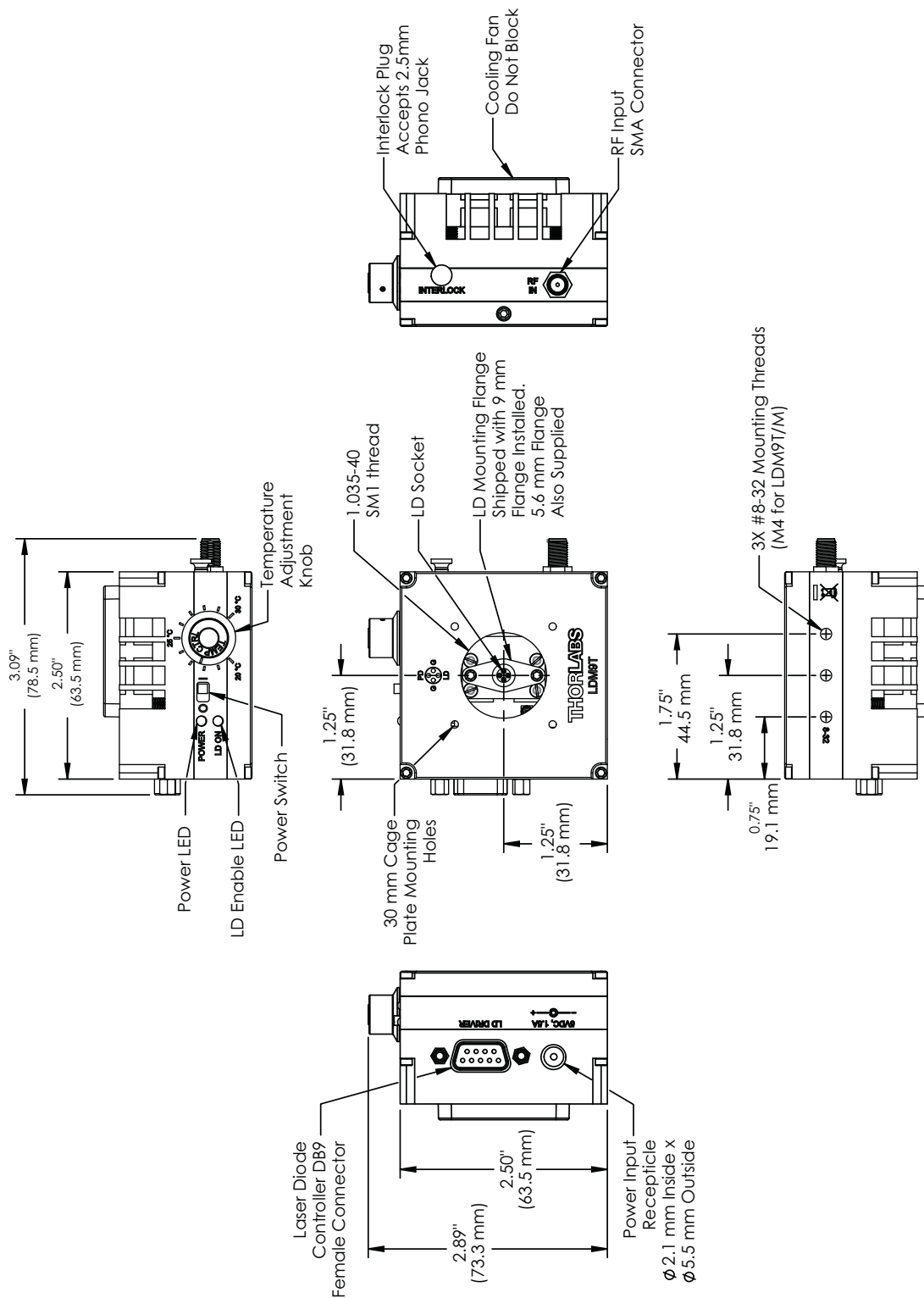


Figure 11 *RF Modulation Through SMA Connector on LM9LP*

Chapter 9 Mechanical Drawing





DET10A(/M) Si Biased Detector

User Guide



Chapter 7 Specifications

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

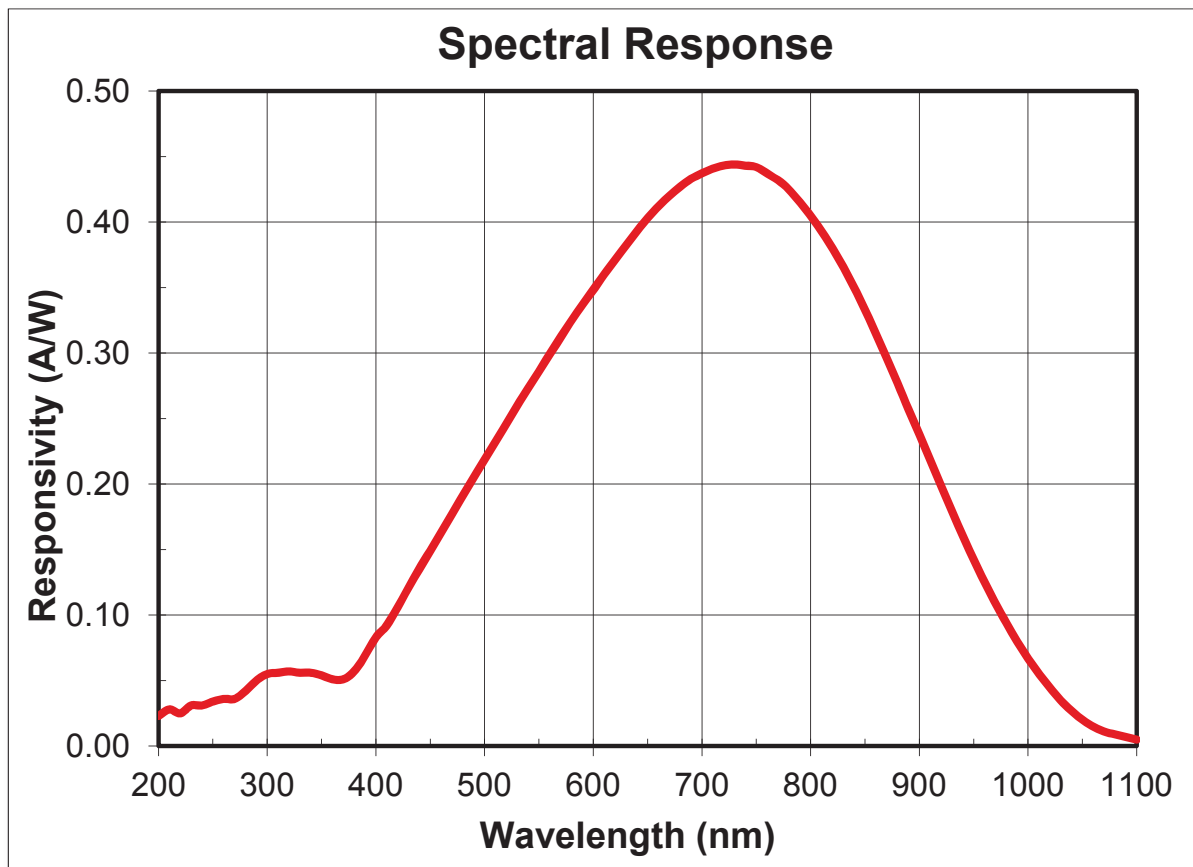
Electrical Specifications		
Detector		Silicon
Active Area		$\varnothing 1.0$ mm (0.8 mm ²)
Wavelength Range	λ	200 to 1100 nm
Peak Wavelength	λ_p	730 nm (typ)
Peak Response ²	$\mathfrak{R}(\lambda_p)$	0.44 A/W (typ)
Shunt Resistance	R_{sh}	1 G Ω (typ)
Diode Capacitance	C_J	6 pF (typ)
Rise Time ^{2,3}	t_r	1 ns (typ)
NEP (830 nm, 10 V)	W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	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 °C
Operating Temp		10 to 50 °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.

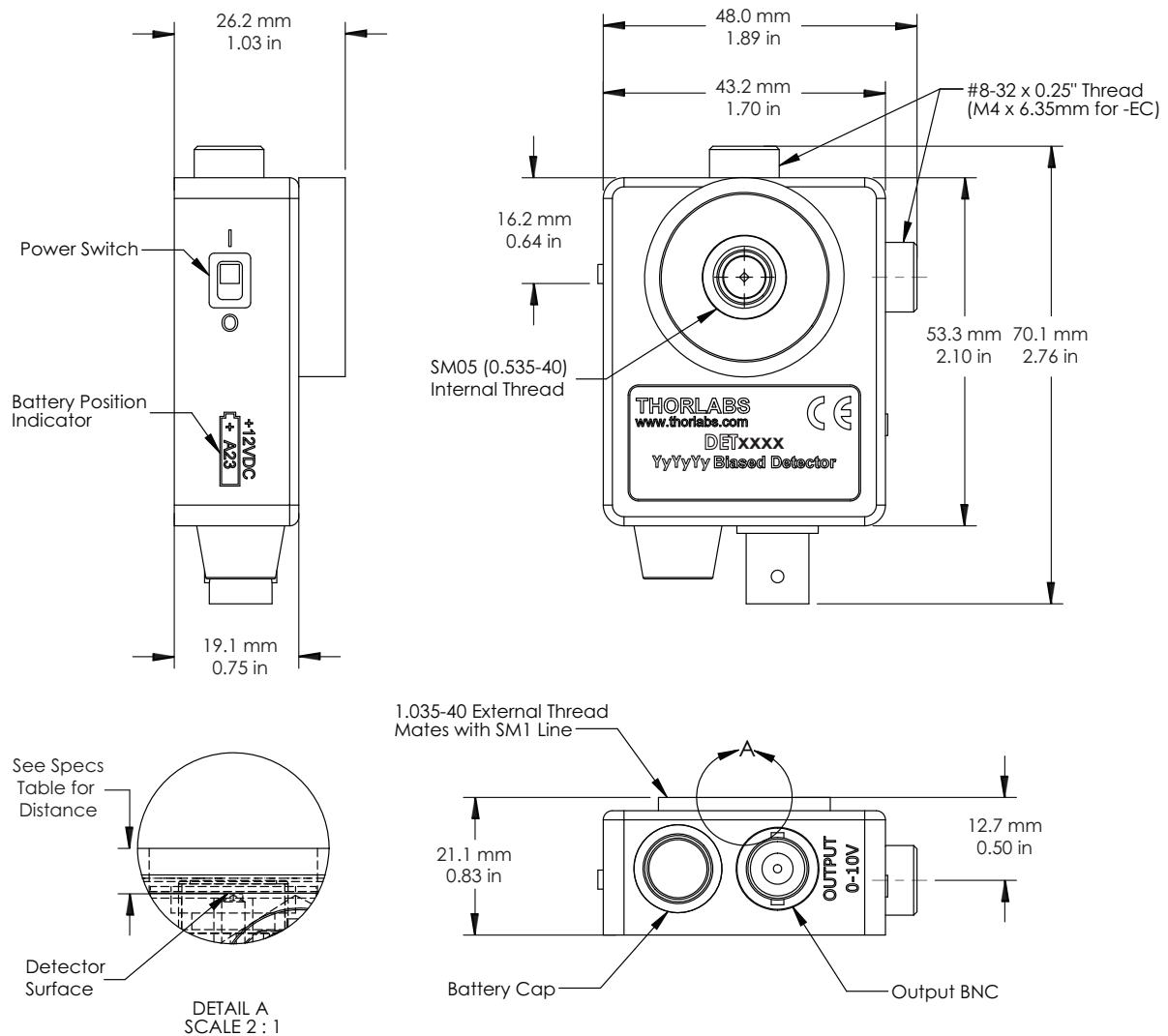
⁴ Assumes the battery voltage drops below 9.6 V. The reverse protection diode generates a 0.6 V drop.

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.) L	U	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

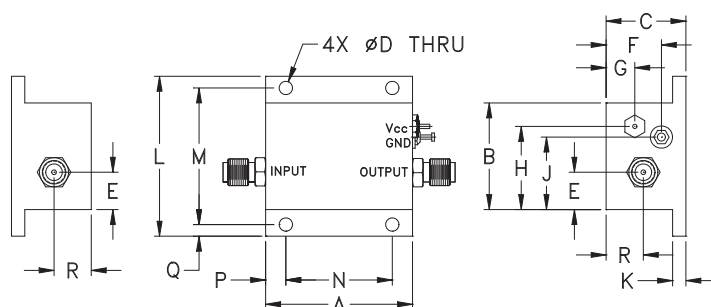
Operating Temperature -40°C to 75°C

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-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



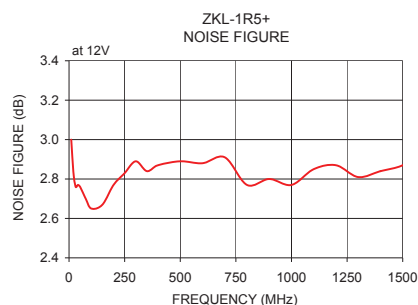
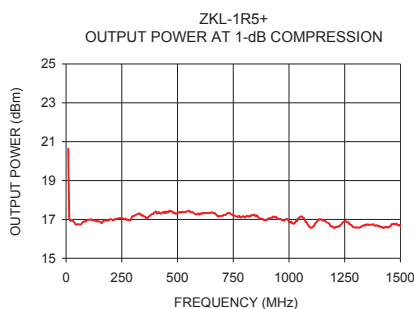
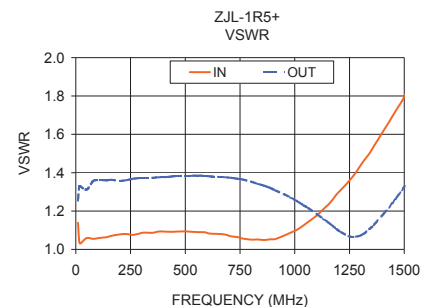
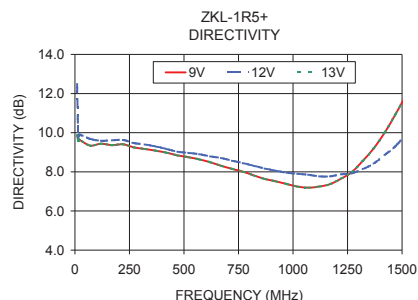
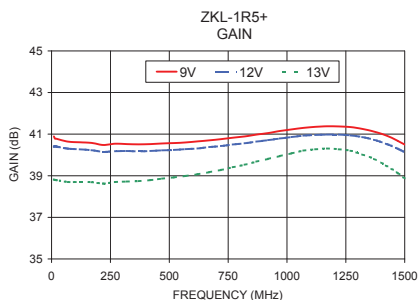
www.minicircuits.com P.O. Box 35166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. C
M143740
ZKL-1R5+
131029
Page 1 of 2

Typical Performance Data/Curves

ZKL-1R5+

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		
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

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



CASE STYLE: BY493

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

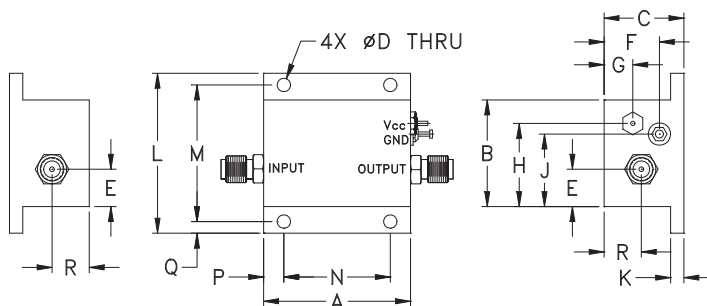
Operating Temperature -40°C to 75°C

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

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

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

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

For detailed performance specs
& shopping online see web site

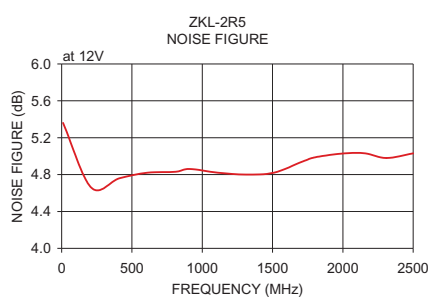
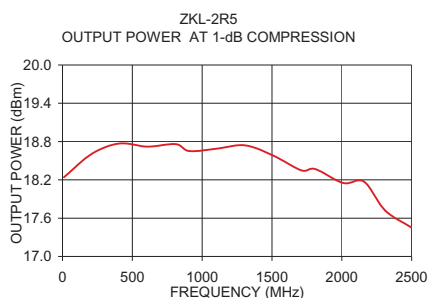
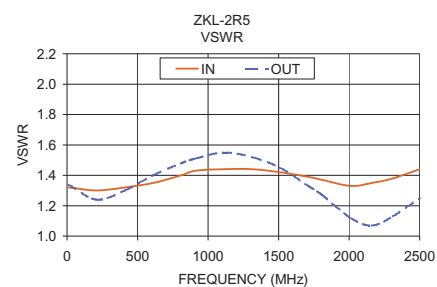
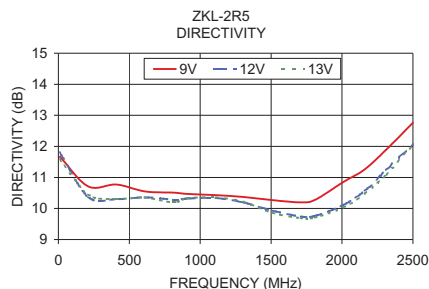
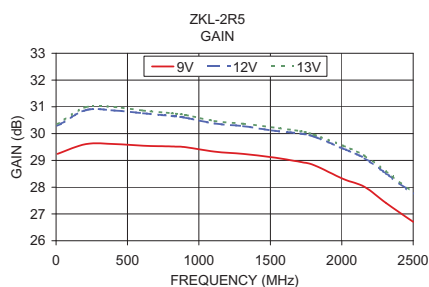
Notes: 1. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification sheet are intended to be excluded and do not form a part of this specification sheet. 2. Electrical specifications and performance data contained herein are based on Mini-Circuit's applicable established 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.

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

ZKL-2R5+ ZKL-2R5

Typical Performance Data/Curves

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		
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



Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

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

IF/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-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.

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

fotec Mini Instrument Specifications

Minimeters

M702A/ Silicon detector/ cal:665,790,850 nm

M712A/ Germanium detector/ cal:850,1300,1550 nm

M712CATV/ Germanium (special) detector/ cal:1300,1550 (@high power)

Measurement Range

M702A, +3 to -55 dBm

M712A, +3 to -55 dBm

M712CATV, +20 to -30 dBm

Resolution: 0.1 dB

Accuracy: +/- 0.2 dB (NIST traceable)

Operating Temperature: 0 to 50 deg.C

Controls: ON/OFF, Calibration wavelength

Power: 9V battery, 120 hrs. life



Minisources

LED Sources

S760 , 665 nm LED with modular adapter for plastic fiber (POF) - NEW

S765, 665, 850 nm, -20 dBm into 62.5/125 MM fiber, ST connector

S770A, 850,1300 nm, -20 dBm into 62.5/125 MM fiber, ST connector

Laser Sources

S665, 650 nm, -3 dBm into MM/SM fiber, choose ST/FC/SC connector ,VFL/FOTracer

S779, 790 nm, -6 dBm into MM fiber, FC conn only, for CD laser based systems

S780, 1300 nm, -6 dBm into SM fiber , choose ST/FC/SC connector, CW/2 kHz

S785, 850nm VCSEL, -6 dBm into MM fiber, ST or SC connector (for GBE)

S790, 1550 nm, -6 dBm into SM fiber , choose ST/FC/SC connector, CW/2 kHz

S795, 1300, 1550, -6 dBm into SM fiber, choose ST/FC/SC, CW/2 kHz (WDM, one output)

Output power : Adjustable over a ~10 dB range to max power shown.

Laser modulation: CW and 2 kHz for use with fiber identifiers

Controls:

Output power: adjustable



Specifications for Plastic Optical Fiber

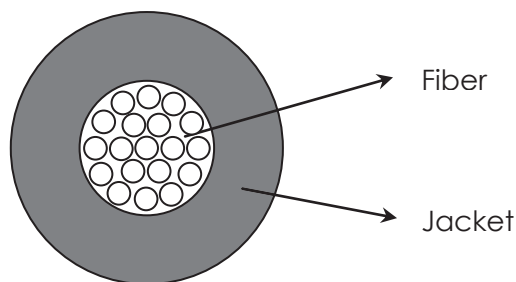
Multi-core POF SMCK-1000P

Issued on : April 1, 2013

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

1, STRUCTURE

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



2, PROPERTIES

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

3, RoHS certification

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

Sample conditions

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

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

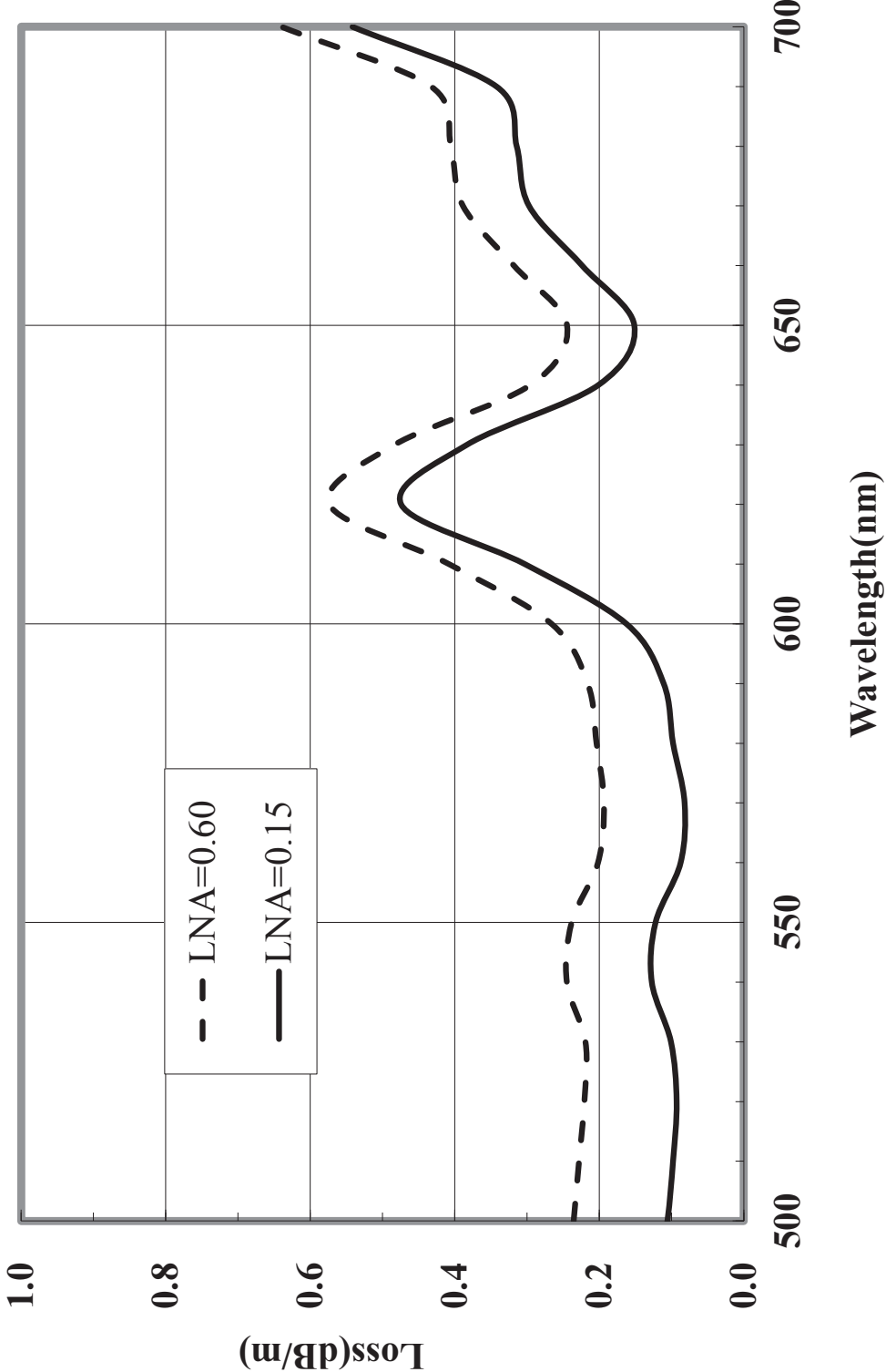
*2 : Interval between grippers = 100 mm, Tensile Speed = 100mm/min

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

Light Source : LED (Peak Wavelength = 657nm)

Transmission Rate ≥ 90%

Spectrum Attenuation : SMCK-1000P



Anexo II – Estructuras de datos

Las estructuras de datos generadas en MatLab incluyen varios parámetros que caracterizan completamente una medida de POF realizada con el sistema propuesto en este trabajo. Algunos de los parámetros que forman la estructura se obtienen directamente con el VNA, sin embargo otros de ellos se obtienen con otros dispositivos de medida.

Hay varios parámetros que se pueden obtener del VNA. Un grupo de datos incluye los parámetros de las medidas como la potencia de modulación, las frecuencias de barrido, el número de puntos... El otro grupo son las propias medidas que incluyen el modulo, la fase y el retardo de grupo de los parámetros S.

Por otra parte otros parámetros que se requieren para completar la caracterización son la corriente de polarización del láser, la potencia a la salida de la fibra y la distancia.

El *software* desarrollado para este trabajo permite además agrupar varias medidas de una misma fibra que comparte ciertos elementos y configuraciones del sistema. Por ejemplo si se realiza una medida de la fibra cambiando los extremos, o añadiendo diferentes tipos de inyecciones sin cambiar el amplificador o la corriente de polarización del láser, los datos pueden ser agrupados en una misma estructura. Un ejemplo de estructura para la medida de una fibra de 25m se muestra en la Figura AII.1:

L25m		
	Longitud	
	Frecuencia Máxima	
	Nº de Lados	
	Intensidad del láser	
	Potencia modulación	
	Frecuencia de muestreo	
	Lado 1	Potencia óptica Eje x S_{21} Fase Desenrollada Retardo de Grupo S_{21} filtrado H_{POF} Frecuencia oscilación Periodo de oscilación Ventana Recomendada Ancho de Banda Error
	Lado 2	...

Figura AII.1: Estructura de MatLab con los parámetros básicos para una medida de POF de 25m por los dos lados.

Para obtener el ancho de banda de la fibra el parámetro fundamental es el módulo del parámetro S_{21} del cual se deriva el ancho de banda, buscado la caída a 6dB del máximo.

Sin embargo el proceso de obtención no es directo ya que es necesario post-procesar la señal y restar del parámetro S_{21} la respuesta de la fibra de referencia.

El aspecto del parámetro S_{21} se muestra en la Figura AII.2 donde se puede observar la magnitud sin procesar y una vez procesada.

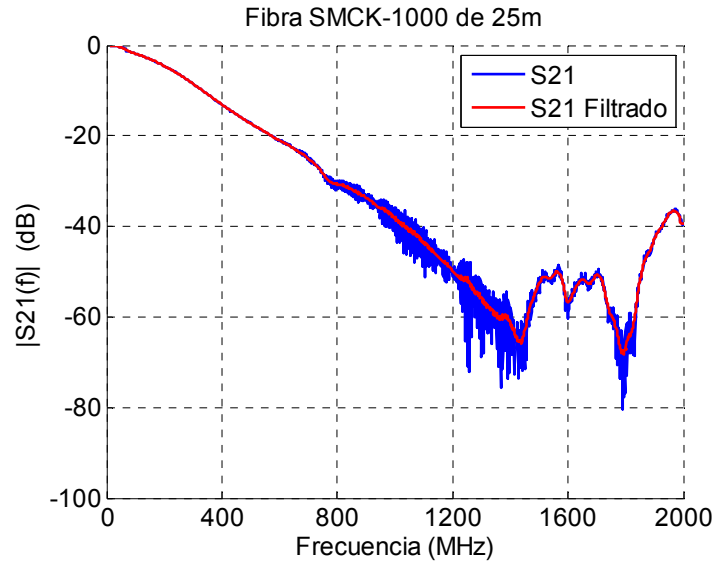


Figura AII.2: Módulo del parámetro S_{21} para una fibra de 25m obtenida directamente del VNA y post-procesada.

Una vez que se han reducido las oscilaciones interferentes debido a las reflexiones se procede a restar la referencia como se detalla en el capítulo 3.3 *Sistema de medida del ancho de banda*. En la Figura AII.3 podemos observar el resultado del proceso. Es en esta respuesta donde hay que buscar la caída a 6dB para determinar el ancho de banda.

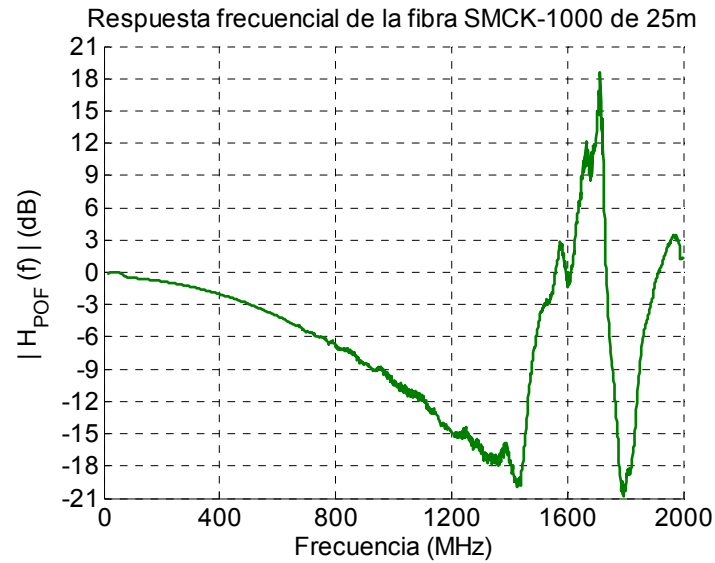


Figura AII.3: Respuesta frecuencial de una fibra de 25m después de restar la referencia.

Por otra parte otra información que proporciona el VNA puede ser utilizada para verificar ciertas características de las fibras que se están caracterizando en el sistema. Por ejemplo con el retardo de grupo se puede aproximar cual es la longitud de la fibra con la expresión (AII.1).

$$l = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tau \quad (\text{AII.1})$$

donde l es la longitud (m), c es la velocidad de la luz (m/s), ϵ_r es la permitividad relativa y τ es el retardo (s).

Los resultados de longitud de la fibra son aproximados, porque hay que tener en cuenta el retardo que introducen el resto de dispositivos (emisor, detector, amplificador...). En la Figura AII.4 se muestra el retardo de grupo para la fibra anterior.

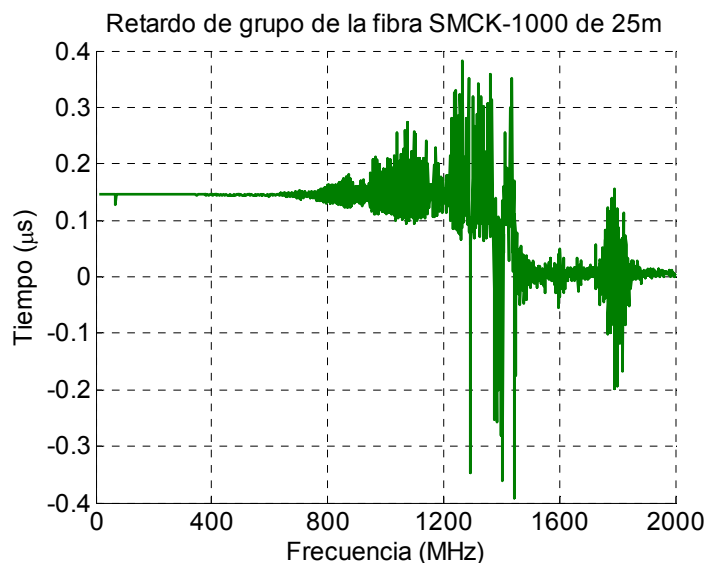


Figura AII.4: Retardo de grupo para una fibra de 25m.

El retardo de grupo se mantiene constante y lineal para frecuencias bajas, mientras que para las altas el comportamiento lineal desaparece. Este efecto se puede asociar a las limitaciones de ancho de banda de los dispositivos o al ancho de banda que presenta la fibra. Cuando el sistema no es capaz de responder a las frecuencias altas el sistema se comporta de forma no lineal. Aparecen entonces retardos de grupo negativos, esto indicaría que el sistema es no causal, hecho que es imposible físicamente.

Además observando la fase desenrollada en la Figura AII.5, observamos como el sistema se comporta de forma causal (la pendiente de la fase es negativa y constante) hasta que llega a un límite en la que deja de serlo. Ese punto coincide en el punto en el que el retardo de grupo deja de ser causal (se vuelve negativo o disminuye considerablemente).

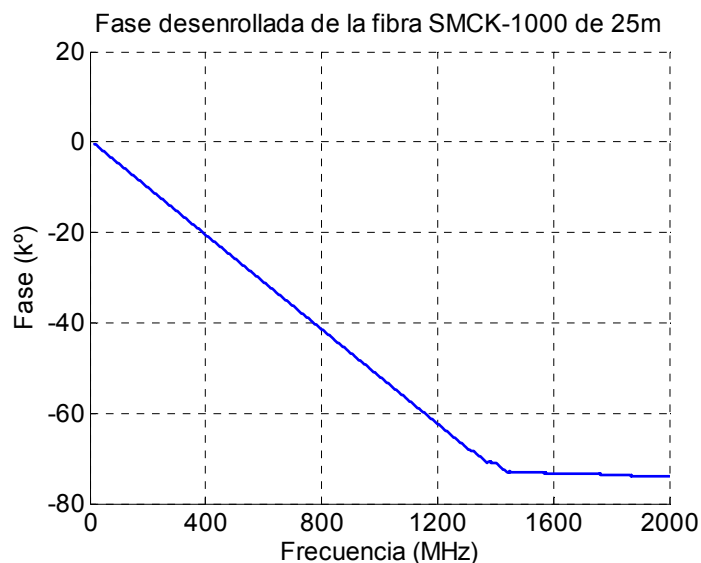


Figura AII.5: Fase desenrollada para una fibra de 25m.

Alternativamente a la información obtenida del VNA, se realizaron medidas del patrón de campo lejano (FFP) para cada longitud de fibra considerada. En la Figura AII.6 se representan los FFP para una longitud de fibra SMCK-1000 con distintas condiciones de inyección.

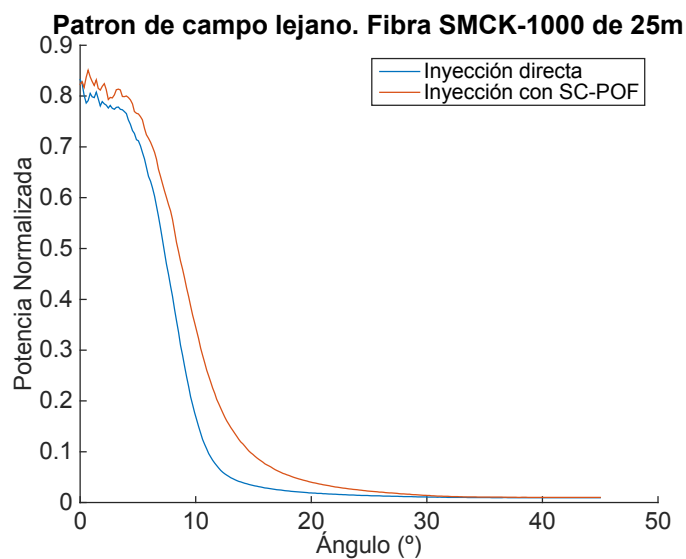


Figura AII.6: Patrón de campo lejano para una fibra SMCK-1000 de 25m con inyección directa y con tramo corto de SC-POF

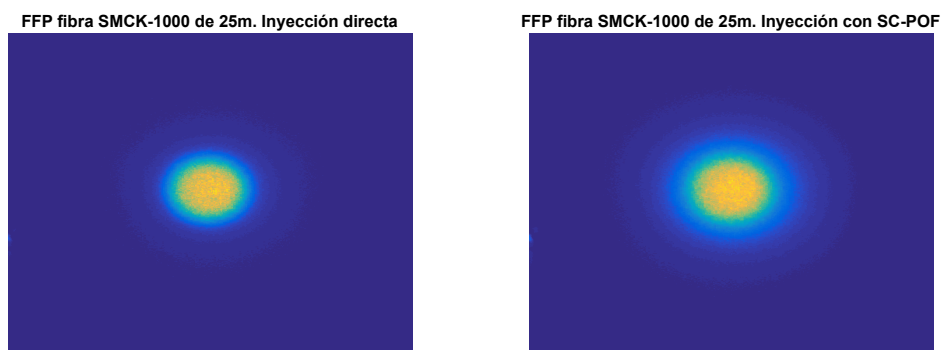


Figura AII.7: Imágenes del patrón de campo lejano para una fibra SMCK-1000 de 25m con diferentes condiciones de inyección.

En la Figura AII.7 se muestra la proyección de la luz que sale de la fibra sobre una pantalla que se encuentra a una cierta distancia. Se puede observar como el campo, cuando la inyección se realiza con un tramo corto de SC-POF, es mayor que con la inyección directa.

Anexo III – Tasas de transmisión

El sistema de medida utilizado para medir la Tasa de Error Binaria (BER) comprende tres dispositivos de medida. El *OptoBER* de Optellent, la placa de control con el *transceiver* para POF y un osciloscopio *Infiniium DCA*. Para controlar el OptoBER es necesario hacer uso de un *software* de control mediante un ordenador [38].

En la Figura AIII.1 se puede observar la Tasa de Error Binario (BER) para la fibra SMCK de 50 m de longitud. El ancho de banda a 3dB para esta longitud era de 352 MHz sin embargo considerando un BER de 10^{-6} la tasa de transmisión es de 600 Mb/s. Este umbral viene establecido por las condiciones del enlace y puede ser aumentado si se aplican técnicas de corrección de errores. Por ejemplo para 10^{-3} la tasa de transmisión es de aproximadamente 900MHz.

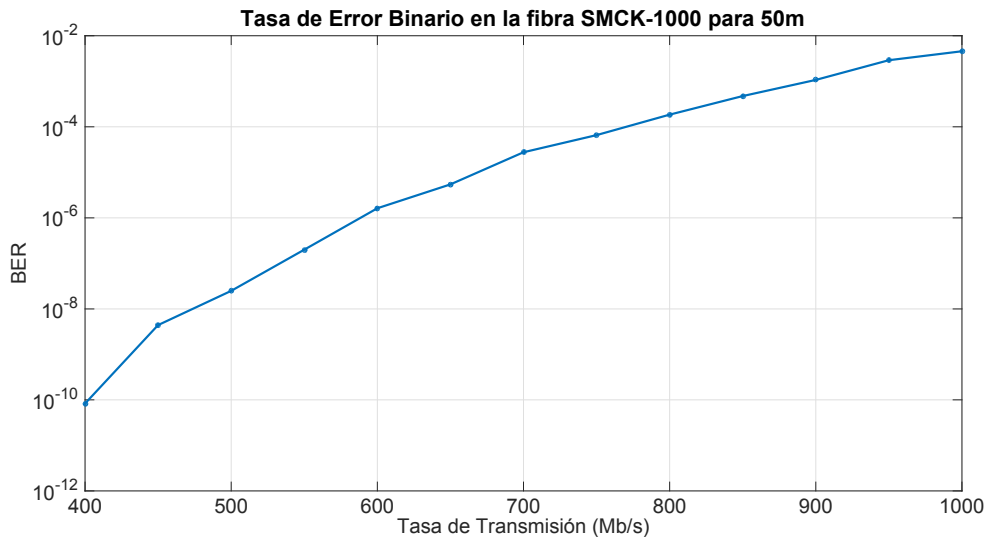


Figura AIII.1: BER frente a tasa de transmisión para una fibra SMCK de 50m

Con este sistema también es posible obtener los diagramas de ojo como se representan en la Figura AIII.2, Figura AIII.3 y la Figura AIII.4.

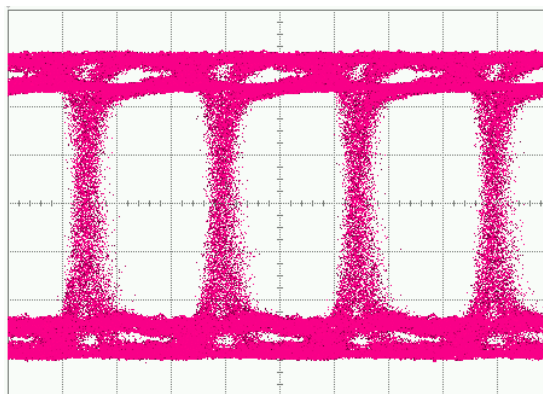


Figura AIII.2: Diagrama de ojo para una tasa de transmisión de 400 Mb/s en una fibra SMCK de 50 m.

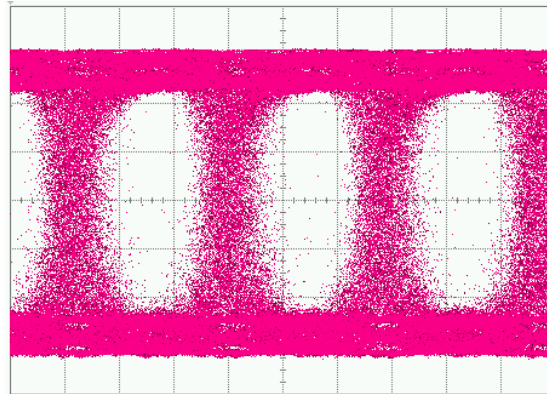


Figura AIII.3: Diagrama de ojo para una tasa de transmisión de 700Mb/s en una fibra SMCK de 50 m.

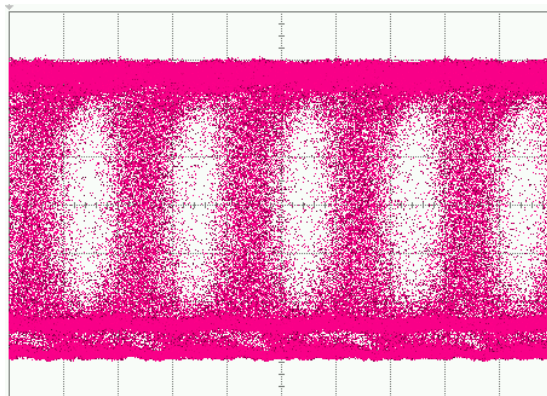


Figura AIII.4: Diagrama de ojo para una tasa de transmisión de 1 Gb/s en una fibra SMCK de 50 m.

En la Figura AIII.2, Figura AIII.3 y la Figura AIII.4 se observa como el diagrama de ojo se cierra conforme la tasa de error aumenta.

Anexo IV – Diagrama de Gantt

Diagrama de Gantt

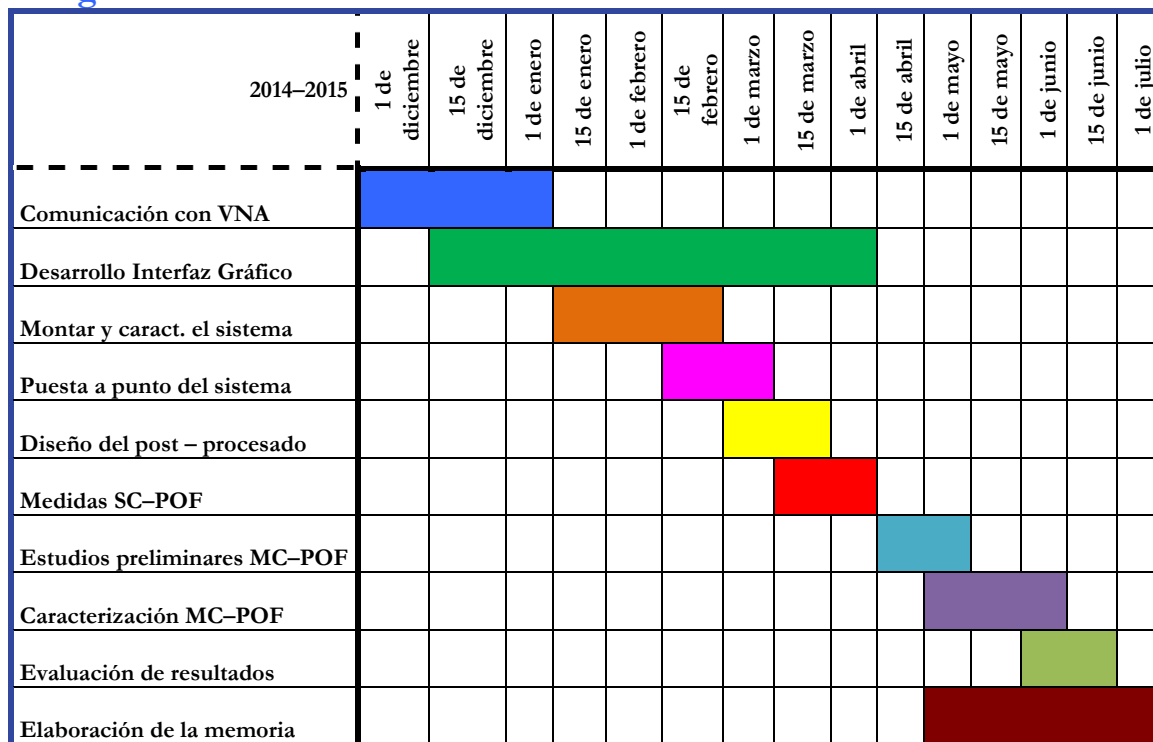


Figura AIV.1: Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto.