

# Trabajo Fin de Grado

Realización de un atenuador variable para fibras  
ópticas de plástico controlado por ordenador

Implementation of a computer controlled  
variable attenuator for POFs

Autora

Candela Muzás Bardají

Directora

M<sup>a</sup> Ángeles Losada Binué

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021

# Realización de un atenuador variable para fibras ópticas de plástico controlado por ordenador

## RESUMEN

La finalidad del proyecto, desarrollado dentro del equipo de trabajo de fibras ópticas de plástico (POFs, Plastic Optical Fibers) del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A, es avanzar en la aplicación de la tecnología asociada a las fibras ópticas de plástico (POFs) en redes de comunicaciones de corto alcance, habituales tanto en sistemas de transporte (vehículos, aviones) como en hogares. En concreto, se pretende desarrollar un atenuador variable con control automático específico para POF, e incorporarlo a diversos sistemas de medida nuevos o ya existentes.

Los atenuadores ópticos son dispositivos fundamentales en la fase de diseño y caracterización de las propiedades de transmisión de sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. Sin embargo, en el caso de las fibras ópticas de plástico (POF) es difícil encontrar atenuadores comerciales, siendo lo habitual que se diseñen e implementen modificaciones de dispositivos desarrollados para fibra de vidrio usando técnicas diversas.

Por ello, en este trabajo se va a construir un atenuador para POF basado en un filtro óptico neutro de forma circular y cuya densidad óptica varía con el ángulo, permitiendo modificar la atenuación sin cambiar la distribución espacial de la señal. La atenuación se modifica mediante la rotación del filtro controlado mediante Arduino, que se ha integrado en una interfaz de usuario consistente en una aplicación para Matlab 2020a<sup>®</sup>, y en una interfaz física compuesta por un teclado y una pantalla.

El sistema puede funcionar con monitorización simultánea de la potencia óptica o con una calibración previa, y está preparado para realizar medidas de parámetros en función de la atenuación. De esta forma, permite su integración en sistemas experimentales para la caracterización de fuentes y detectores ópticos, medidas de penalización de potencia, tasa de error de bit, etc.

El diseño que se ha caracterizado en cuanto a distintos parámetros, como pérdidas de inserción, ensanchamiento de la distribución espacial de potencia, o modificaciones en la respuesta en frecuencia introducidas en un sistema, hasta dar con las combinaciones de dispositivos ópticos concretos que presentan las mejores prestaciones. Por último, se han desarrollado diferentes aplicaciones que demuestran la utilidad del atenuador.

En conclusión, el laboratorio de POF cuenta ahora con un atenuador de diseño flexible, controlado por ordenador mediante una interfaz de usuario sencilla que permite gran variedad de opciones para facilitar su utilización e integración en distintos sistemas de medida. El atenuador es ligero, compacto y portátil, y los programas de control pueden instalarse en cualquier ordenador de gama media que cuente con Matlab 2020a<sup>®</sup> y Windows 10.

# Agradecimientos

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

*A M<sup>a</sup> Ángeles Losada y Alicia López, por su ayuda y dedicación durante este trabajo.*

*A mi familia y amigos, por el apoyo incondicional que siempre me han dado, y por estar ahí durante estos cuatro años de carrera.*

# Tabla de contenidos

## 1 Contenido

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN .....  | 2  |
| 1. Introducción .....  | 10 |
| 2 Fibras de plástico .....   | 12 |
| 2.1 Fabricación de las POF.....                                    | 12 |
| 2.2 Propiedades de transmisión.....                                | 13 |
| 2.2.1 Atenuación .....   | 13 |
| 2.2.2 Dispersión.....  | 14 |
| 3 Diseño del atenuador .....                                       | 16 |
| 3.1 Funciones y especificaciones.....                              | 16 |
| 3.2 Configuración de los componentes ópticos .....                 | 17 |
| 3.3 Programas de control.....                                      | 21 |
| 3.3.1 Diagrama de bloques.....                                     | 21 |
| 3.3.2 Modificaciones sobre el control del motor .....              | 22 |
| 3.3.3 Programas de control del medidor de potencia .....           | 25 |
| 3.3.4 Interfaz de usuario .....                                    | 25 |
| 4 Caracterización .....  | 28 |
| 4.1 Caracterización del modo con monitorización.....               | 28 |
| 4.1.1 Pérdidas de inserción. ....                                  | 28 |
| 4.1.2 Ensanchamiento de la distribución de potencia .....          | 29 |
| 4.2 Caracterización del modo sin monitorización.....               | 32 |
| 4.2.1 Pérdidas de inserción .....                                  | 32 |
| 4.2.2 Ensanchamiento de la distribución de potencia .....          | 33 |
| 4.2.3 Respuesta en frecuencia .....                                | 33 |
| 5 Aplicaciones.....  | 36 |
| 5.1 Modo de monitorización.....                                    | 36 |
| 5.1.1 Caracterización de la curva de eficiencia del detector ..... | 36 |
| 5.1.2 Caracterización de fuentes ópticas .....                     | 37 |
| 5.2 Modo sin monitorización .....                                  | 40 |



|  |   |    |
|--|---|----|
| 5.2.1  | Comparación de BER vs tasa de transmisión ..... | 40 |
| 5.2.2  | Medidas de BER vs potencia recibida.....        | 43 |
| 6  | Conclusiones.....                               | 45 |
| 6.1  | Conclusiones.....                               | 45 |
| 6.2  | Líneas futuras .....                            | 47 |
| 7  | Bibliografía.....                               | 48 |
| Anexo I. Circuito de control del motor.....                      |   | 51 |
| Interfaz de usuario .....  |   | 51 |
| Teclado matricial 5x4.....                                       |   | 51 |
| Expansor 8 bits para bus I2C.....                                |   | 51 |
| Pantalla OLED .....  |   | 52 |
| Circuito de control .....  |   | 53 |
| Motor paso a paso bipolar .....                                  |   | 53 |
| Etapa de potencia ULN2001 .....                                  |   | 53 |
| Librerías .....  |   | 54 |
| Funcionalidades.....   |   | 55 |
| Anexo II. Caracterización de acopladores .....                   |   | 57 |
| Anexo III. Manual y guía de instalación.....                     |   | 59 |
| Instalación.....   |   | 59 |
| Manual .....   |   | 60 |
| Anexo IV. Sistemas Experimentales .....                          |   | 62 |
| Respuesta en frecuencia.....                                     |   | 62 |
| Medida de patrón de campo lejano (FFP) .....                     |   | 64 |
| Medidas de BER .....   |   | 65 |
| Anexo V. Código desarrollado .....                               |   | 68 |
| Funciones y código para el control del medidor de potencia. .... |   | 68 |
| Código de la aplicación de Matlab.....                           |   | 68 |
| Propiedades.....   |   | 68 |
| Funciones.....   |   | 69 |
| Callbacks de ejecución y cierre.....                             |   | 72 |
| Callbacks dentro del menú "General" .....                        |   | 73 |

|   |     |
|---|-----|
| Callbacks dentro del menú “Modo Barrido” .....                      | 78  |
| Código de Arduino .....   | 80  |
| Anexo VI. Medidas de BER vs potencia recibida .....                 | 97  |
| Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos..... | 100 |

# Tabla de figuras

|  |    |
|--|----|
| Fig. 2.1. Clasificación de POF según su perfil de índice [12] .....  | 13 |
| Fig. 2.2. Curvas de atenuación espectral para fibras de PMMA [13] .....  | 14 |
| Fig. 2.3. Transmisión de los rayos de luz a través de fibra SI-POF y GI-POF [13] .....   | 14 |
| Fig. 2.4. Definición del ancho de banda a -3dB [14].....   | 15 |
| Fig. 2.5. Productos BL para fibras fabricadas con distintas tecnologías [12] .....   | 15 |
| Fig. 3.1. Esquema de los componentes ópticos del atenuador .....   | 17 |
| Fig. 3.2. Configuración del atenuador .....  | 18 |
| Fig. 3.3. Variación de la atenuación según el ángulo de rotación, tras inyecciones de 520nm y 650nm con el NDC-50C-2M.....   | 19 |
| Fig. 3.4. Configuración del modo monitorización .....  | 21 |
| Fig. 3.5. Configuración del modo directo .....   | 21 |
| Fig. 3.6. Diagrama de bloques del sistema completo .....   | 22 |
| Fig. 3.7. Diagrama de flujo del programa de Arduino .....  | 23 |
| Fig. 3.8. Pestaña "General" de la aplicación diseñada mediante Matlab App Designer .....   | 26 |
| Fig. 3.9. Pestaña "Modo Barrido" de la aplicación diseñada mediante Matlab App Designer ...  | 27 |
| Fig. 4.1. Comparación de EAF utilizando distintos acopladores con distintos puertos de entrada y salida.....   | 31 |
| Fig. 4.2. Curvas de EAF para el atenuador de bloqueo en función de la atenuación, con láser LD650.....   | 31 |
| Fig. 4.3. Curvas de EAF para los sistemas con las fibras MH, GH y BH, comparando los sistemas con y sin atenuador.....   | 33 |
| Fig. 4.4. Respuesta en frecuencia de las fibras de 20m con atenuador y sin atenuador, con receptor SPD .....   | 35 |
| Fig. 4.5. Respuesta en frecuencia de las fibras de 20m con atenuador y sin atenuador, con receptor SPA.....  | 35 |
| Fig. 5.1. Esquema del montaje experimental del sistema de caracterización de detectores.....   | 36 |
| Fig. 5.2. Curvas de eficiencia del SPD y del SPA para 520nm .....  | 37 |
| Fig. 5.3. Curvas de eficiencia del SPD y del SPA para 650nm .....  | 37 |
| Fig. 5.4. Respuesta en frecuencia del sistema medido para distintas intensidades con el detector SPD.....  | 38 |
| Fig. 5.5. BER en función de la tasa de bit para distintas intensidades .....   | 39 |
| Fig. 5.6. Tasa de bit para distintas intensidades. En este caso, se iguala la potencia inyectada en el sistema entre los casos de 80mA y 90mA introduciendo atenuación ..... | 40 |
| Fig. 5.7. Montaje para la media de BER respecto a frecuencia.....  | 41 |
| Fig. 5.8. BER en función de la tasa de bit igualando el voltaje en los cuatro sistemas .....   | 42 |
| Fig. 5.9. BER en función de la tasa de bit sin igualar el voltaje .....  | 42 |
| Fig. 5.10. Barridos de potencia para las tres fibras con los dos detectores, en 500Mbps.....   | 43 |
| Fig. 5.11. Penalización de potencia para cada sistema, según la tasa de bit y el detector utilizado .....  | 44 |
| Fig. I. Configuración de un teclado matricial 5x4 .....  | 51 |
| Fig. II. Pinout del expansor I2C.....  | 52 |
| Fig. III. Pantalla OLED con conexión I2C .....   | 53 |
| Fig. IV. Motor bipolar .....   | 53 |
| Fig. V. Esquema de funcionamiento de la etapa de potencia.....   | 54 |
| Fig. VI. Comparación de la EAF de los distintos acopladores sin el atenuador en el sistema....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. VII. Elementos del paquete de instalación .....  | 59 |
| Fig. VIII. Localización de la aplicación VarAtt entre el resto de Apps de Matlab .....      | 60 |
| Fig. IX. Interfaz gráfica de la aplicación, dividida por bloques .....                      | 60 |
| Fig. X. Esquema del montaje experimental para la medida de la respuesta en frecuencia ..... | 62 |
| Fig. XI. Interfaz gráfica de la aplicación pof.m.....                                       | 63 |
| Fig. XII. Esquema de montaje para la medida del FFP .....                                   | 64 |
| Fig. XIII. Montaje físico para la medida del FFP.....                                       | 64 |
| Fig. XIV. Interfaz del programa MedidasAngulares.....                                       | 65 |
| Fig. XV. Esquema de montaje para la medida del BER.....                                     | 66 |
| Fig. XVI. Interfaz de usuario del programa controlador del OPTOBER .....                    | 67 |
| Fig. XVII. Nombres de los objetos interactivos de la pestaña "General" .....                | 73 |
| Fig. XVIII. Nombres de los objetos interactivos de la pestaña "Modo barrido" .....          | 78 |

## Tabla de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3.1. Parámetros de los modelos de NDF que se han estudiado.....   | 19 |
| Tabla 3.2. Disposición del teclado matricial.....   | 24 |
| Tabla 4.1. Pérdidas de inserción del atenuador óptico con el montaje experimental FIBRA MH 1,5m + NDF40AR .....   | 29 |
| Tabla 4.2. Pérdidas de inserción del atenuador óptico con el montaje experimental FIBRA MH 1,5m + NDF40AR .....   | 32 |
| Tabla 4.3. Condiciones de medida para el cálculo de la respuesta en frecuencia.....   | 35 |
| Tabla 5.1. Potencia inyectada al sistema según la intensidad de la fuente.....  | 39 |
| Tabla 5.2. Componentes y parámetros utilizados en la sesión de medida.....  | 41 |
| Tabla 5.3. Según el sistema óptico, el voltaje recibido originalmente y la atenuación necesaria para igualarlo a los 60.12mV. Se incluyen también los voltajes correspondientes a la segunda sesión de medida ..... | 42 |
| Tabla I. Librerías utilizadas en el proyecto de Arduino .....   | 55 |
| Tabla II. Pérdidas de inserción del acoplador IF542 medidas en 650nm (dB) .....   | 57 |
| Tabla III. Potencia medida en los puertos del acoplador IF542 según el puerto de inyección, para 650nm (dB).....  | 57 |
| Tabla IV. Tasas de acoplo del IF541 medidas en 650nm (%).....   | 58 |
| Tabla V. Tasas de acoplo de IF542' medidas en 650nm (%) .....   | 58 |
| Tabla VI. Parámetros introducidos en pof.m para el cálculo del parámetro S21 .....  | 63 |
| Tabla VII. Comparaciones entre los tres sistemas ópticos.....   | 98 |
| Tabla VIII. Comparaciones entre las diferentes tasas de bit.....  | 99 |

## 1. Introducción

El sub-grupo de fibras ópticas de plástico (Plastic Optical Fibre, POFs) perteneciente al grupo de tecnologías fotónicas (GTF) del I3A, tiene como línea principal promover la aplicación de la tecnología asociada a las POFs en redes de comunicaciones de corto alcance, habituales tanto en sistemas de transporte (vehículos, aviones) como en hogares.

Las fibras ópticas de plástico son fibras multimodo de mucho mayor tamaño y apertura que las fibras de vidrio estándar y cuyos mínimos de atenuación se encuentran en la región visible del espectro [1]. Estas características las han convertido en un medio de transmisión competitivo para entornos de corto alcance pues, aunque tienen mayor atenuación y menor ancho de banda que las fibras de vidrio, su fácil manipulación abarata los costes de instalación y mantenimiento y pueden combinarse con componentes de bajo coste. El uso de la POF en automóviles para transmisión de datos a baja velocidad ha estado en vanguardia pues en este entorno es crucial, además de su menor coste, su resistencia a curvaturas, vibraciones, etc. [2]. Todas estas características facilitaron su introducción, combinado con WiFi, como medio de transmisión en redes de distribución dentro del hogar, promovida por distintas compañías entre ellas la española KDPOF que comercializa dispositivos que permiten transmitir a 1Gbps [1], [3]. El éxito de las POFs en estos entornos, llamó la atención de las compañías aeronáuticas que pensaron en ellas para su uso como medio de transmisión en redes de datos de baja capacidad dentro del avión [4].

Las necesidades cada vez mayores de estas redes ponen en evidencia las limitaciones de la POF por lo que la investigación del grupo de POF en los últimos años se ha centrado en conseguir sistemas POF de mayor capacidad. Por ello, sus objetivos actuales se centran en el estudio y modelado de nuevos tipos de fibra con mayor ancho de banda potencial, como las de gradiente de índice (GI-POF) y las de múltiples núcleos (MC-POF), y el diseño de nuevas técnicas de transmisión con mayor eficiencia espectral [5], [6] [7].

Desde su inicio, el grupo desarrolla de forma simultánea varias líneas de investigación dentro del marco de la aplicación de las POFs en redes de comunicaciones: caracterización experimental de fibras, desarrollo de modelos de POF para entornos de simulación de redes, y diseño y realización de dispositivos y redes basados en POFs. Este proyecto se puede enmarcar tanto en la línea de realización de dispositivos como en la de caracterización, ya que tiene como objetivo desarrollar un atenuador variable, específico para fibras ópticas de plástico que pueda incorporarse a diversos sistemas de medida del laboratorio.

Los atenuadores ópticos son dispositivos fundamentales en la fase de diseño y caracterización de las propiedades de transmisión de sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. Sin embargo, en el caso de las POFs, es difícil encontrar atenuadores comerciales, siendo lo habitual que se diseñen e implementen modificaciones de dispositivos desarrollados para fibra de vidrio usando técnicas diversas. Estos dispositivos son caros y, además, no tienen en cuenta las características particulares de las fibras de plástico [8], [9]. Es el caso de un atenuador para POF basado en el método de bloqueo que ya se ha caracterizado en el laboratorio, comprobando que introduce degradación en la respuesta en frecuencia de la fibra. El motivo es que la distribución modal de potencia óptica en fibras de plástico se modifica al atravesar elementos que suponen alguna perturbación espacial (lentes, elementos que bloquean la luz...) que están presentes en el diseño mencionado. Además, la degradación es diferente según el valor de la atenuación y la localización del atenuador en el enlace [10]. De esta forma, se llegó a la conclusión de que para realizar un atenuador para POF se requieren especificaciones más

estrictas que en el caso de fibras de vidrio, exigiendo no sólo bajas pérdidas de inserción, alta resolución, y amplio rango de atenuación si no, además, que no se modifiquen las condiciones en todo el rango de atenuación.

Así pues, surge la idea de realizar un diseño de atenuador basado en un filtro óptico neutro de forma circular (Neutral Density Filter, NDF) cuya densidad óptica varía con el ángulo. La idea inicial es situar dos fibras, una a cada lado del filtro, lo más próximas posible y controlar éste de forma manual para variar la atenuación. Con este diseño y, si la posición de las dos fibras no cambia, la distribución de intensidad será la misma en todo el rango de atenuación. Las primeras pruebas, realizadas con un filtro de 2.5 cm de diámetro, fueron alentadoras de forma que el siguiente paso fue el de realizar el movimiento del filtro mediante un motor controlado por Arduino [11].

Este proyecto parte de este trabajo y completa el diseño, realización y caracterización del atenuador en varios aspectos. Por un lado, se realiza un programa de control del Arduino a través de Matlab con un entorno gráfico de fácil manejo que ofrece distintos modos de trabajo con el atenuador. Uno de estos modos consiste en el uso de un acoplador que permite la medida simultánea de la potencia óptica recibida lo que es fundamental para la realización de algunos experimentos. Por otro lado, se analiza y mejora el diseño físico, probando filtros de distintas características y realizando distintas configuraciones teniendo en cuenta sus efectos sobre las propiedades de las fibras. Durante el desarrollo de este trabajo, se han realizado experimentos para la caracterización de dispositivos activos y fibras en combinación con distintos equipos de medida presentes en el laboratorio de POF. Estos experimentos han permitido optimizar el diseño físico y los programas de control del atenuador y mejorar la interfaz de usuario.

La organización de la memoria es la siguiente. Tras esta introducción, se presenta un capítulo sobre fibras ópticas de plástico. En el capítulo 3, se describe con detalle el diseño del atenuador, tanto en cuanto a su configuración física y los elementos ópticos, como a la estructura de los programas desarrollados para su control. En el capítulo 4, se presenta la caracterización de sus propiedades. En el capítulo 5, se describen distintos experimentos que han servido para mejorar el diseño, optimizar el entorno de usuario y demostrar su eficacia. Finalmente, en el capítulo 6 se resumen las conclusiones obtenidas y se presentan las posibles líneas de continuación.

## 2 Fibras de plástico

Las fibras ópticas son guías de luz basadas en el fenómeno de la reflexión total para lograr la transmisión de datos con unas pérdidas muy bajas. Se pueden dividir en dos grandes grupos según el material con el que hayan sido fabricadas: las fibras ópticas de vidrio, altamente implementadas y desarrolladas debido a sus propiedades de alta capacidad a largas distancias; y las fibras ópticas de plástico, una tecnología más reciente pero altamente implementada en entornos de corto alcance, como redes en el hogar o automóviles. A pesar de presentar capacidades de transmisión más bajas que las fibras de vidrio, presentan otras propiedades físicas que las hacen muy deseables para este tipo de entornos. Al presentar aperturas numéricas más altas, pueden ser combinadas con fuentes ópticas menos exigentes en cuanto a precisión y, por tanto, más económicas. Además, al trabajar en un rango de luz visible, presentan una mayor seguridad ocular, algo fundamental para su implementación en redes domésticas.

### 2.1 Fabricación de las POF

Las POF son una guía de ondas altamente transparente compuestas por tres regiones: la región central es el núcleo (core), comúnmente fabricado de polimetilmetacrilato (PMMA,  $n = 1.491$ ) y con un diámetro próximo a 1 mm. Su dimensión y su material de fabricación suponen la mayor diferencia de estas fibras frente a las fibras de vidrio multimodo, que presentan núcleos de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de 50 o 62.5 micras de diámetro. El núcleo está recubierto de un fino recubrimiento (cladding), con una anchura del rango de las decenas de micras, que presenta un índice de refracción de 1.41, por lo que su apertura numérica es cercana a 0.5, frente a la apertura de 0.2 de las fibras de vidrio. Por último, para evitar daños en el recubrimiento, se añade un revestimiento de protección (jacket), sin influencia sobre la refracción. Adicionalmente, existen POFs de menor tamaño (250  $\mu\text{m}$ ) fabricadas con materiales perflourinados que presentan una menor atenuación y dispersión.

Existen dos tipos principales de fibras ópticas de plástico según el tipo de índice: las fibras de salto de índice (SI-POF) y las fibras de índice gradual (GI-POF). Las fibras de salto de índice fueron el primer tipo de POF desarrollados y se caracterizan por su índice de refracción constante en el núcleo. En el caso de las fibras de índice gradual, el índice de refracción cambia gradualmente a lo largo del núcleo, aportando menor dispersión modal y, por tanto, siendo óptimas para comunicaciones.

Adicionalmente, existen otros tipos de POFs clasificadas según su perfil de índice (Fig. 2.1), utilizadas en situaciones específicas: la MSI-POF (Multistep index POF), que logra un índice de refracción gradual a partir de varios saltos de índice, utilizado en aplicaciones que requieran de una baja apertura numérica; y la MC-POF (Multicore POF), que aporta mejoras en la capacidad de transmisión mediante técnicas de multiplexación espacial. Las llamadas POF de baja apertura por los fabricantes son un ejemplo de MC-POF con un doble recubrimiento que es lo que produce aperturas numéricas de 0.25-35.



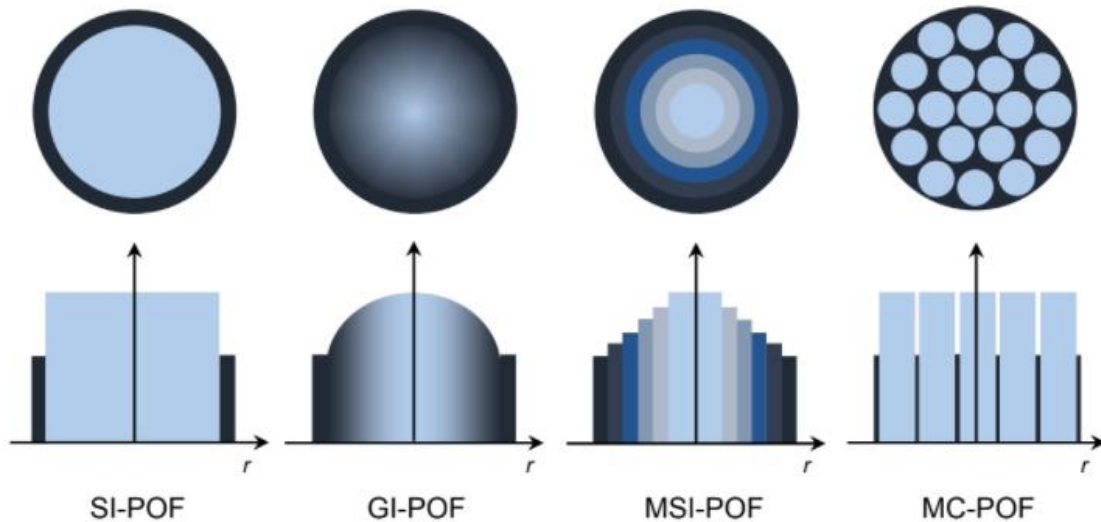


Fig. 2.1. Clasificación de POF según su perfil de índice [12]

## 2.2 Propiedades de transmisión

Como se ha mencionado, las POFs tienen una apertura numérica significativamente mayor a la de las fibras multimodo de vidrio, lo que permite la propagación de millones de modos. Por ello, al referirnos a POFs, se tratarán los modos (o ángulos de propagación) como una distribución continua en lugar de valores discretos como en el caso de las fibras de vidrio. Además, su material de fabricación, el PMMA, es mucho más difusivo que el dióxido de silicio. Esto hará que se produzca un mayor acoplo modal, existiendo un mayor intercambio de energía entre modos adyacentes. Estas propiedades van a producir una alta variabilidad en las medidas tomadas con estas fibras, ya que las hacen altamente dependientes de la inyección, la terminación de los extremos de la fibra, y factores externos como curvaturas o presión sobre las fibras.

### 2.2.1 Atenuación

La atenuación se define como la pérdida de potencia óptica al realizarse la transmisión. Decae exponencialmente según la longitud de la fibra y el tipo de fibra utilizada, como se expresa en la siguiente relación.

$$P(l) = P(0) \cdot 10^{\frac{-\alpha \cdot l}{10}} \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la fibra, que expresa la pérdida de potencia óptica por unidad de longitud [dB/km].

La atenuación viene dada por tres efectos físicos: absorción debida a los materiales de la fibra o a impurezas introducidas en el proceso de fabricación, difusión y radiación, normalmente causada por curvaturas o imperfecciones periódicas. Adicionalmente, la atenuación depende también de la anchura del espectro, de la ventana de trabajo, y de la apertura numérica de la fibra. Un aumento en la apertura numérica o en la anchura del espectro supondrá también una mayor atenuación. Por otro lado, el PMMA tiene unas curvas de atenuación dependientes de la longitud de onda, como se observa en la siguiente Fig. 2.2 en la que se representa la variación del coeficiente de atenuación  $\alpha$  según la longitud de onda para fibras de PMMA.

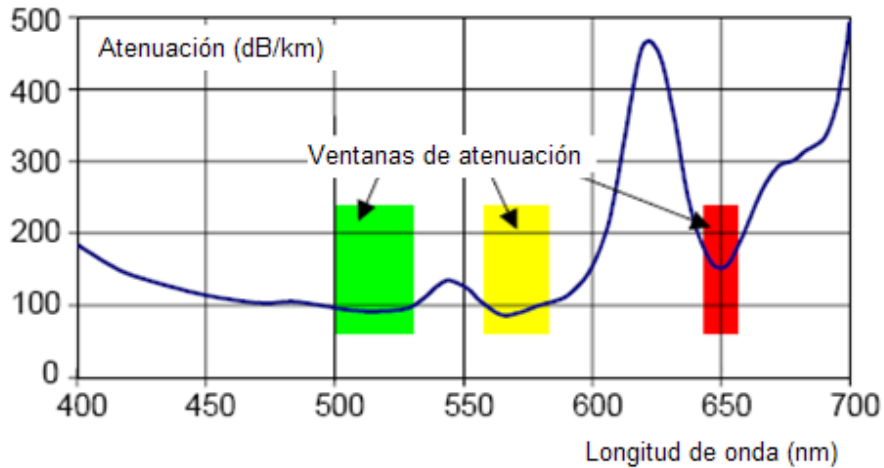


Fig. 2.2. Curvas de atenuación espectral para fibras de PMMA [13]

Como vemos, las ventanas óptimas de trabajo se dan para 520nm (verde), 570nm (amarillo) y rojo (650nm), por lo que son las ventanas típicas de trabajo para emisión de POF. Por otro lado, en las fibras de vidrio, las longitudes de onda para las que se dan mínimos de atenuación están por encima de 1000 nm (región del infrarrojo) y presentan coeficientes de atenuación unas 1000 veces más bajos. Por este motivo, las fibras ópticas de vidrio son preferidas para comunicaciones a larga distancia, mientras que las POF son utilizadas en redes de corto alcance.

### 2.2.2 Dispersión

La dispersión es un fenómeno provocado por las diferentes velocidades de propagación que se dan entre modos, polarizaciones, longitudes de onda, etc. transmitidos en la fibra. En el caso de las POF, el tipo de dispersión predominante es la dispersión modal, que se da cuando los modos recorren diferentes caminos debido a su distinto ángulo de propagación. Como se observa en la Fig. 2.3, especialmente para el caso de la SI-POF, los modos más bajos recorren caminos más directos, mientras que los modos superiores, realizan un recorrido mayor y, por tanto, llegan al extremo de la fibra con distintos retardos, ensanchando las señales transmitidas. En el caso de la GI-POF, debido a su variación gradual de índice, los rayos que recorren una mayor distancia viajan a mayor velocidad, haciendo que el retardo sea similar para todos los modos transmitidos.

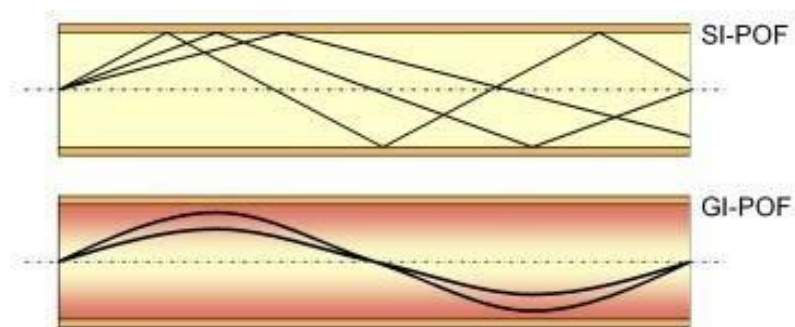


Fig. 2.3. Transmisión de los rayos de luz a través de fibra SI-POF y GI-POF [13]

El ensanchamiento de los pulsos hace que la respuesta en frecuencia pase de ser plana para todo el rango frecuencial, a tener un comportamiento paso bajo, donde solo las frecuencias más bajas se transmiten con una atenuación razonable. En la Fig. 2.4, se representa la respuesta en

frecuencia para definir el ancho de banda a -3dB, que es la frecuencia para el cual la señal ha decaído a la mitad del máximo obtenido en continua.

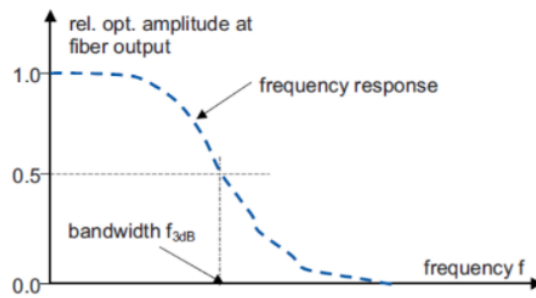


Fig. 2.4. Definición del ancho de banda a -3dB [14]

Un parámetro que describe la capacidad de la fibra es el producto distancia-ancho de banda, que expresa el ancho de banda máxima que puede transmitir un enlace de fibra en función de su longitud. En la siguiente figura (Fig. 2.5), se muestra cómo varía este parámetro según la tecnología de fabricación de distintas fibras. Si bien las fibras ópticas de vidrio son las que presentan resultados más altos, as POFs perfluorinadas presentan productos BL comparables a las fibras multimodo de vidrio.

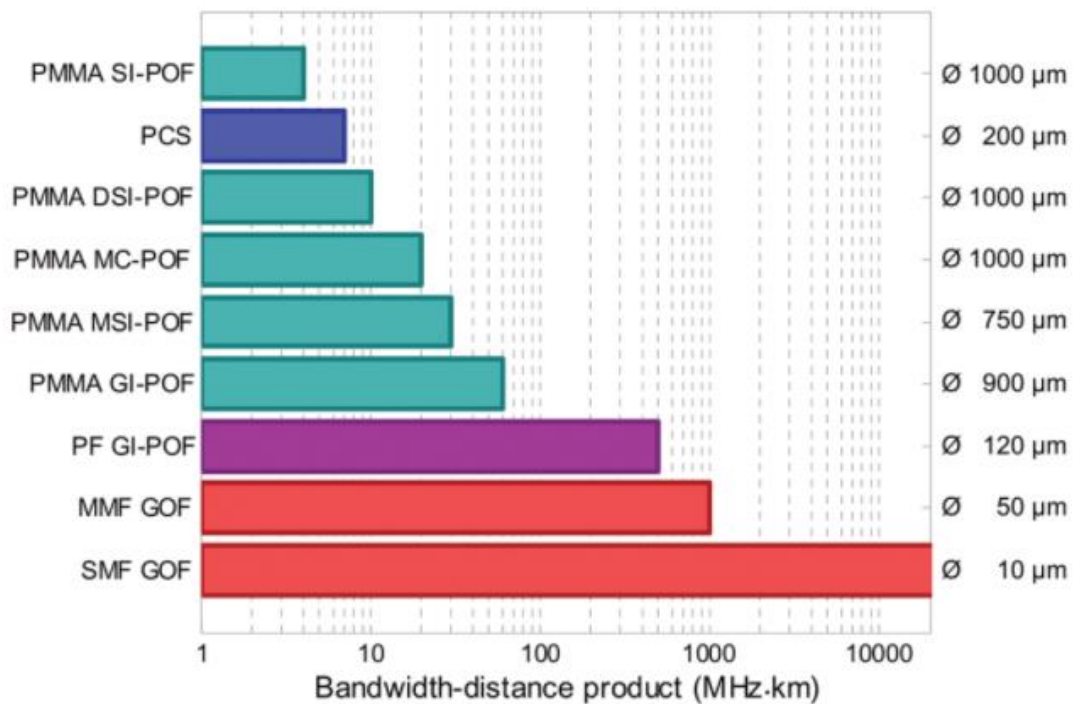


Fig. 2.5. Productos BL para fibras fabricadas con distintas tecnologías [12]

## 3 Diseño del atenuador

### 3.1 Funciones y especificaciones

A continuación, se especifican las funciones, a nivel de producto, que debe cumplir el atenuador y que se dirigen a tener un producto manejable por cualquier usuario realizando su función de atenuación de forma eficiente en sistemas ópticos basados en POFs.

- Introducir atenuación óptica variable en un sistema óptico con POF con bajas pérdidas de inserción, alta resolución, y amplio rango de atenuación sin que se modifique la distribución de intensidad en dicho rango de atenuación.
- Permitir variar la atenuación conociendo su valor de forma simultánea, bien incorporando al sistema un medidor de potencia óptica o con una calibración previa.
- Ser portátil. De esta forma, podrá ser incluido en sistemas experimentales con facilidad.
- Ser controlable de forma directa tanto por una interfaz de usuario física como a través de un programa de ordenador que permita realizar operaciones más complejas, como el guardado de medidas o la realización de barridos de atenuación.

A partir de estas funciones, podemos pasar a definir las especificaciones técnicas. Estas especificaciones indicarán tanto el tipo de tecnologías ópticas necesarias para cumplir con las funciones desarrolladas anteriormente, como las tecnologías de control óptimas para un funcionamiento correcto.

- Utilización de un filtro neutro circular de densidad óptica variable (NDF) controlado por un motor bipolar como elemento atenuador óptico. La principal ventaja de este diseño es que la distribución de intensidad es la misma para cualquier valor de la atenuación. Además, con un buen alineamiento de las fibras se pueden minimizar las pérdidas de inserción.
- Se deberá realizar un soporte ligero que permita mantener la fibra de entrada y salida muy próximas al NDF y entre sí, diseñado para incluir también el motor bipolar, que, mediante una correa, ejecutará el giro del NDF.
- La activación del motor irá controlada por Arduino. Este procesador nos permitirá comunicar las distintas interfaces de usuario con el motor bipolar. Tiene un consumo bajo y una capacidad de procesamiento suficiente para nuestra aplicación.
- Se ha seleccionado comunicación I2C para interactuar con la interfaz de usuario física del dispositivo y comunicación serial para la comunicación con el ordenador
- La alimentación será de 5V, coincidiendo con la alimentación requerida por el procesador. Se obtendrá mediante el conector USB utilizado para la comunicación serie.
- La interfaz de usuario será programada con Matlab App Designer<sup>®</sup>. Este entorno de programación nos permitirá crear un archivo ejecutable en cualquier ordenador que cuente con la versión 2020a.
- La aplicación deberá ser fácilmente instalable en cualquier ordenador con Matlab 2020a y Windows 10. El paquete de instalación incluirá los drivers y la propia instalación de la aplicación. Se detalla en el *Anexo III. Manual y guía de instalación*

- Por último, será necesaria la comunicación con otros instrumentos ópticos, concretamente de un medidor de potencia Thorlabs PM100D USB con sensor S150C desde la interfaz software (las hojas de características de ambos se encuentran en *el Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos*). Esta se llevará a cabo principalmente mediante el protocolo de comunicación VISA, aprovechando los drivers para Matlab aportados por los fabricantes o procediendo a su creación.

### 3.2 Configuración de los componentes ópticos

El diseño que proponemos está basado en un filtro de densidad neutra circular cuya densidad óptica relacionada con el coeficiente de transmisión, varía con el ángulo. La idea es interponer el filtro entre dos fibras de forma que la luz transmitida de una a otra se atenúe en su paso a través del filtro. El montaje consistirá en una fibra corta llamada lanzadera que se conectará por un extremo a una fuente óptica y que, por el otro, se situará a un lado del filtro (Fig. 3.1). En el otro lado del filtro, se situará el extremo de una segunda fibra (colectora). El otro extremo será conectado a un sistema de medida (fotodetector, receptor, etc.). Además, una o ambas fibras pueden instalarse con un sistema de alineamiento XYZ.

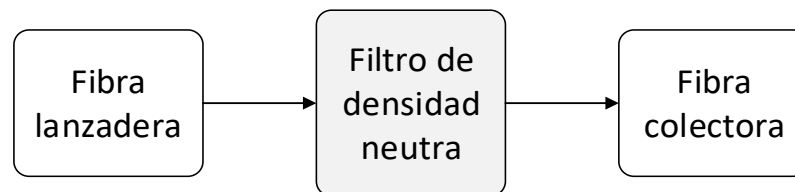


Fig. 3.1. Esquema de los componentes ópticos del atenuador

El principio de funcionamiento del atenuador óptico variable será girar este filtro los grados necesarios para obtener una atenuación determinada. Las primeras pruebas se realizaron en un montaje en el que cada uno de estos componentes (atenuador y fibras lanzadera y colectora) estaban instalados en sistemas XYZ de forma independiente y el giro se realizaba de forma manual. Posteriormente, se decidió automatizar el sistema mediante un motor bipolar paso a paso (28BYJ-48) conectado al filtro mediante una correa de transmisión que se encarga del giro “físico” del disco y está controlado mediante una placa Arduino [11]. El sistema electrónico capaz de controlar el giro del motor se desarrolla en el *Anexo I. Circuito de control del motor*.

En este punto, se diseñó una carcasa compacta de plástico para alojar el filtro, además del motor y la correa de transmisión de movimiento (Fig. 3.2). Esta pieza se realizó mediante una impresora 3D. Finalmente, durante la realización de este proyecto, se incorporó al diseño de la carcasa un vástago que permite alojar un posicionador de fibra para fijar una de ellas. Esta carcasa tiene unos surcos en su base que permiten fijarla a cualquiera de las mesas ópticas del laboratorio. En particular, se utilizan las mesas ópticas MB3045/M de Thorlabs que son compactas y ligeras y permiten transportar fácilmente el sistema. En la siguiente figura se muestra el sistema completo con sus elementos principales señalados. Arriba a la izquierda, un detalle con la carcasa en la que se integra el NDF y el motor.

El diseño del atenuador está basado en componentes que normalmente se encuentran en cualquier laboratorio de comunicaciones ópticas (filtros, posicionadores de fibra, etc.). Su realización práctica permite, además, que puedan cambiarse y utilizarse en otros montajes, ya

que no son específicos para esta aplicación. Por otra parte, el motor, la correa, las placas de Arduino etc son elementos baratos, por lo que se puede hablar de un dispositivo de coste medio.

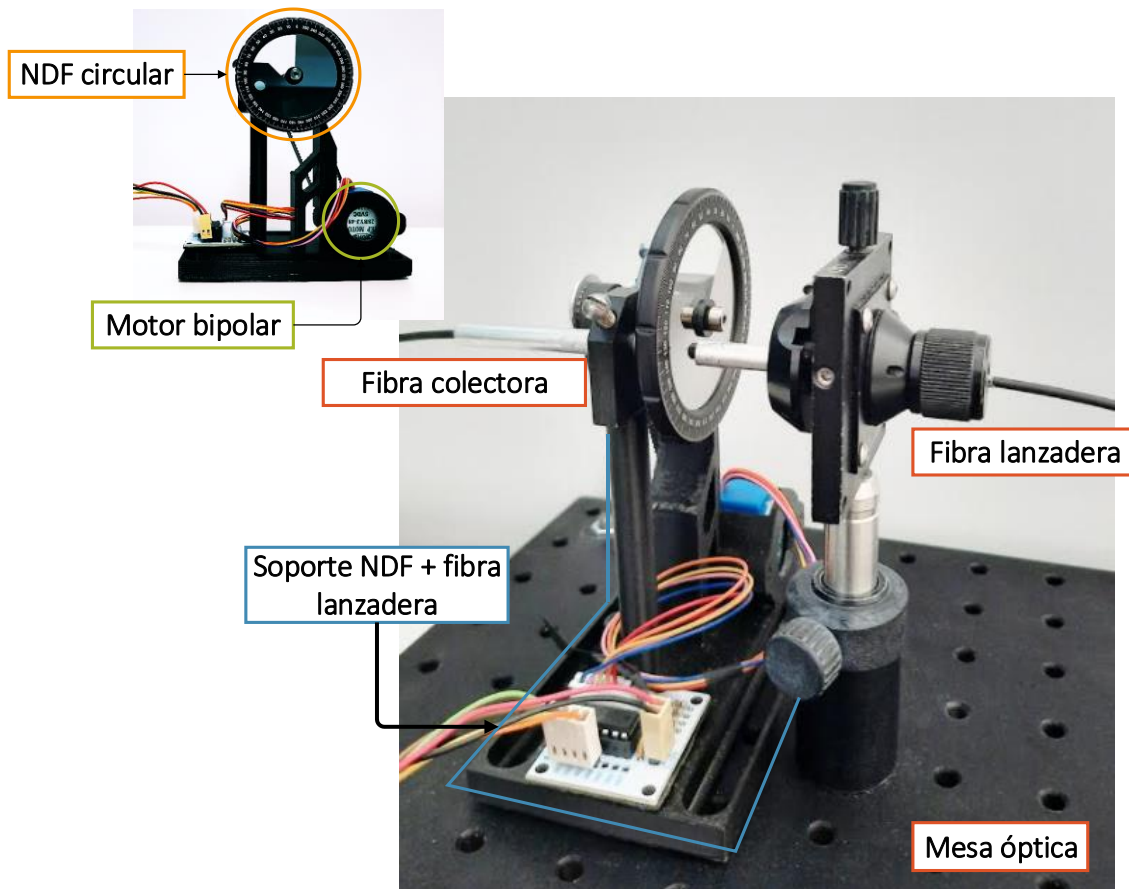


Fig. 3.2. Configuración del atenuador

Los filtros circulares de densidad óptica neutra presentan una respuesta plana para las longitudes de onda en luz visible pero su densidad óptica (OD) varía con el ángulo de giro ( $\alpha$ ) siguiendo la siguiente ecuación [15]:

$$OD = m \cdot \alpha, \quad m = 0.00741 \text{ para modelos de } 0.02 \text{ a } 2dB \quad (2)$$

$$m = 0.0148 \text{ para modelos de } 0.02 \text{ a } 4dB$$

Donde la densidad óptica se define como

$$OD = \log_{10}\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

Siendo T la transmitancia del filtro.

De esta forma, dependiendo de su posición, permite transferir más o menos luz, atenuando la señal óptica. La densidad aumenta de forma logarítmica, es decir, aumenta linealmente al medir la atenuación en dB. En la siguiente figura (Fig. 3.3), se representa la variación de la atenuación en función del ángulo de rotación para uno de los filtros, utilizando como fuentes el LED de 650nm del kit Fotec para POF y el láser LD520P050 con emisión en 520nm de Thorlabs. Puede verse que la atenuación varía linealmente con el ángulo y que es independiente de la longitud de onda.

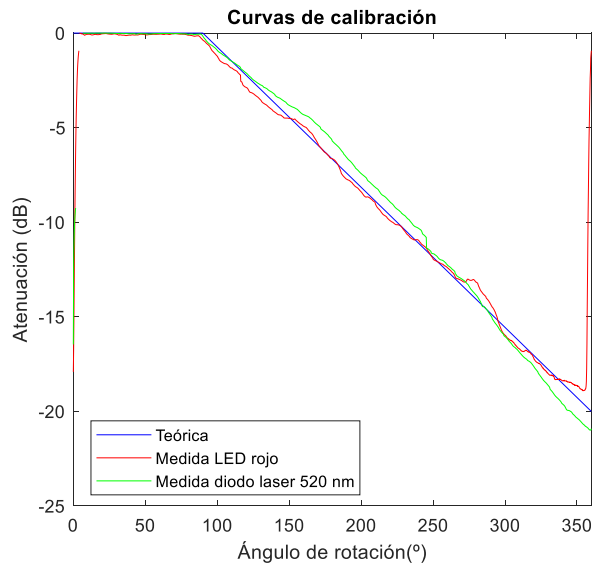


Fig. 3.3. Variación de la atenuación según el ángulo de rotación, tras inyecciones de 520nm y 650nm con el NDC-50C-2M

Existen diferentes modelos de NDF circular, cuyos parámetros variables son su rango de atenuación, su diámetro y si existe recubrimiento antirreflejante. En nuestro caso, disponemos de cinco filtros de densidad neutra cuyas hojas de características se incluyen en el *Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos*, aunque sus características principales se muestran en la Tabla 3.1.

| Artículo [1] | Rango de Atenuación (dB) | Diámetro (mm) | Antirreflejante |
|--------------|--------------------------|---------------|-----------------|
| NDC-25C-2M   | 0-20dB                   | 25            | No              |
| NDC-50C-2M   | 0-20dB                   | 50            | No              |
| NDC-50C-4M   | 0-40dB                   | 50            | No              |
| NDC-100C-4M  | 0-40dB                   | 100           | No              |
| NDC-50C-4M-A | 0-40dB                   | 50            | Sí              |

Tabla 3.1. Parámetros de los modelos de NDF que se han estudiado

El rango de atenuación indica la máxima atenuación, cuyo valor, combinado con el diámetro del filtro, determina la resolución del mismo. Si contamos con un filtro de pequeño diámetro y amplio rango de atenuación, en cada grado va a haber un diferencial de atenuación mayor. Por ello se han escogido los filtros con 50 cm de diámetro. Aunque una de las carcasas fabricadas es capaz de acomodar el filtro de 100 cm, no se ha utilizado ya que aumenta el tamaño del montaje y dificulta su portabilidad. Por último, existe la opción de contar con una capa de antirreflejante que permite reducir las pérdidas por reflexión de Fresnel, consiguiendo menores pérdidas de inserción, como se indica en las hojas de características.

Un parámetro común a todos los modelos de NDF es su espesor de 2 mm, lo que implica que el desalineamiento longitudinal entre las fibras lanzadera y la colectora será siempre mayor que este valor.

El precio actual de estos filtros, que puede encontrarse en la página de Thorlabs, oscila entre los 360 y los 660 euros, dependiendo de su tamaño. El NDC-50C-4M-A con recubrimiento antirreflejante se adquirió por 470 euros. Este es el elemento más costoso de los elementos específicos que constituyen el sistema atenuador (placas, Arduino, correa, carcasa, etc.).

En este proyecto, se ha realizado un entorno basado en Matlab que permite al usuario fijar un valor de atenuación o potencia óptica, y realizar barridos en función de este parámetro. Se ha diseñado de forma que pueda trabajar en dos modalidades: una, con pre-calibración y otra, con monitorización simultánea de potencia. Para esta modalidad, es necesario utilizar un sistema divisor que permita simultáneamente monitorizar la potencia a la salida del atenuador y llevar la señal al sistema de medida en cada caso. Para ello, se han utilizado los acopladores de fusión específicos para POF fabricados por Industrial Fiberoptics, cuyas características, especificadas en el *Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos*, los hacen especialmente adecuados para nuestro propósito. Son dispositivos todo-fibra, con bajas pérdidas de inserción y se comercializan con distintos porcentajes de división (50/50, 20/80 y 10/90). Inicialmente, se valoró utilizar un cubo divisor integrado en la carcasa, pero este método ha sido descartado por sus mayores pérdidas de inserción al requerir 2 fibras colectoras y no permitir acercarse suficientemente con el consiguiente aumento de las pérdidas de inserción.

En el diseño propuesto para el modo con monitorización (Fig. 3.4), uno de los puertos del acoplador se utiliza como fibra colectora enfrentado al filtro y las dos salidas se conectan de tal forma que se envíe un gran porcentaje de la potencia óptica al sistema óptico en estudio, mientras que una pequeña parte quede reservada para la monitorización. Esta monitorización se consigue a través de un medidor de potencia controlado por ordenador, que también se maneja desde la aplicación.

El medidor de potencia que es indispensable en el modo con monitorización, deberá también de utilizarse para calibrar el dispositivo. Será esencial que el medidor de potencia sea integrable con la aplicación del atenuador. El medidor nos aportará procesos más precisos, ya que permitirá calibrar el atenuador siempre que sea necesario y comprobar que la atenuación aplicada sea válida en todo momento. En nuestro caso, hemos escogido el medidor de potencia PM100D USB de Thorlabs, ya que el software que lo controla permite integrar la interacción del medidor de potencia con cualquier aplicación. El sensor incorporado al medidor de potencia es el sensor S150C que es capaz de medir potencias entre 100 pW (-70 dBm) y 5 mW (7 dBm) como se muestra en sus hojas de características.

En el caso de trabajar en la modalidad con pre-calibración (Fig. 3.5), no será necesario contar con el sistema divisor y el medidor de potencia, ya que el atenuador se guiará por una curva de calibración previamente tomada. En este caso, tras el atenuador, se situará un sistema óptico, constituido por una fibra colectora enfrentada al atenuador seguida por un fotodetector o un receptor óptico.



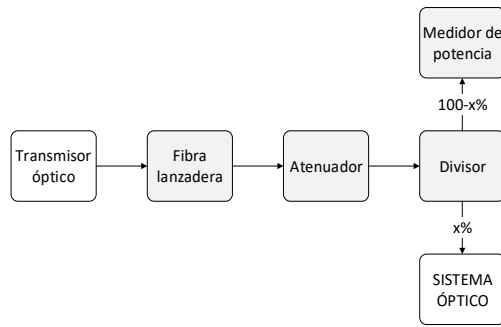


Fig. 3.4. Configuración del modo monitorización

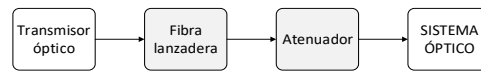


Fig. 3.5. Configuración del modo directo

### 3.3 Programas de control

Como se ha dicho, el proyecto tomó como punto de partida un trabajo anterior en el que se realizó una interfaz física de control directo por parte del usuario a través de un teclado numérico, que permite seleccionar los pasos del motor, y visualizar este valor en una pantalla OLED. Los detalles de esta interfaz se presentan en el *Anexo I. Circuito de control del motor* [11]. En este trabajo, se han introducido modificaciones a este control directo de usuario a través del teclado numérico, añadiendo nuevas funcionalidades como el cálculo de la atenuación aplicada a partir de una curva de pre-calibración, y también se ha desarrollado un entorno de Matlab que permite, entre otras funcionalidades, convertir la atenuación o potencia ópticas seleccionadas por el usuario a un ángulo de giro, realizar calibraciones y hacer barridos en función de la potencia. Además, se ha modificado el proyecto original para lograr entablar una comunicación con el ordenador en el que se ejecuta la aplicación de Matlab.

En este apartado, se detallarán los programas utilizados para el control del atenuador. En primer lugar, se explicarán las modificaciones del programa original de Arduino que controla el motor, y, a continuación, se desarrollará el funcionamiento del programa de Matlab, incluyendo el procesado que se lleva a cabo para introducir atenuaciones determinadas.

#### 3.3.1 Diagrama de bloques

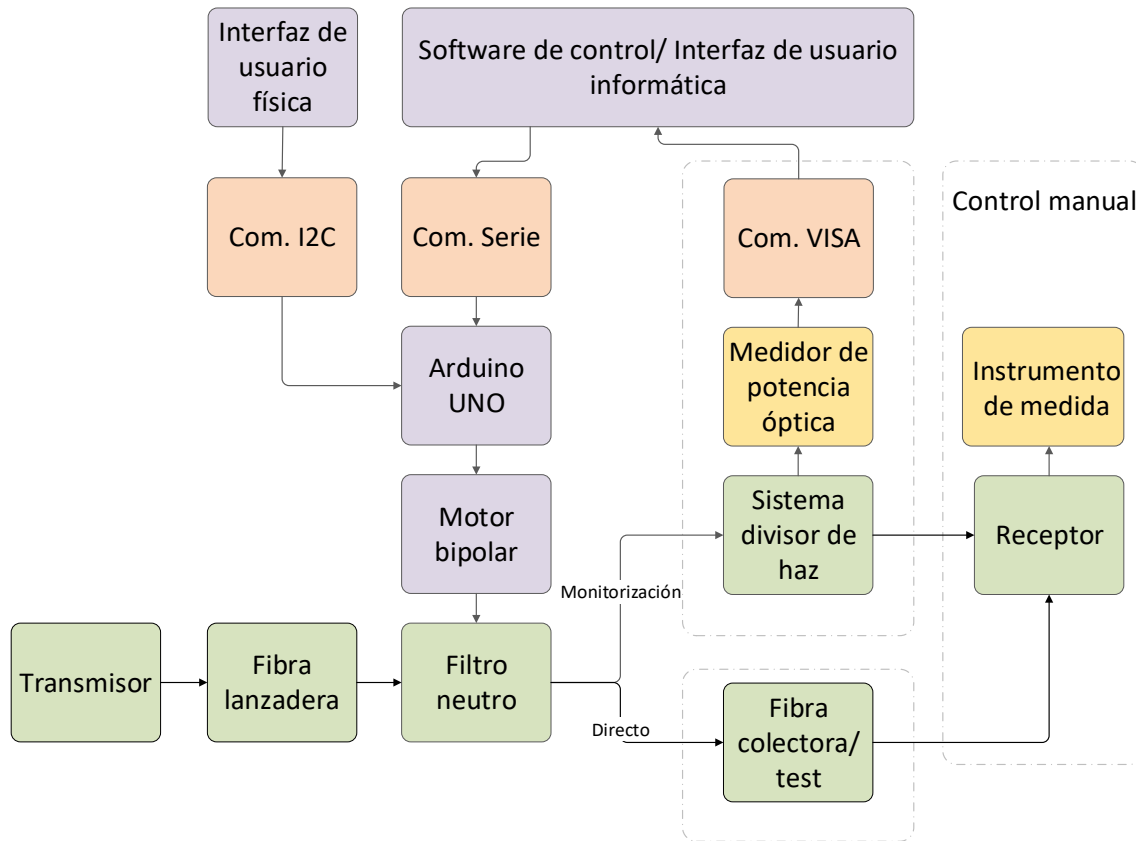
Observando el diagrama de bloques de la Fig. 3.6. Diagrama de bloques del sistema completo Fig. 3.6, el control del atenuador se puede dividir en un sistema principal, compuesto por las dos interfaces de usuario, el Arduino, el motor bipolar y el filtro; y distintos subsistemas adicionales que se pueden incluir según el modo de trabajo seleccionado.

Como vemos, en el sistema principal, el Arduino interconecta las dos interfaces de usuario, permitiendo el control del motor bipolar desde ambas. La interfaz de usuario física, compuesta por un teclado matricial y una pantalla OLED se comunica con el Arduino mediante comunicación I2C, ya que, como se expone en el *Anexo I. Circuito de control del motor*, es la comunicación óptima en este caso.

Por otro lado, para la comunicación con la interfaz informática, se ha decidido implementar comunicación serie, ya que, como la comunicación serie se realiza a través de un USB, nos proporcionará también una alimentación de 5V, que nos permitirá alimentar el circuito de control.

El subsistema, compuesto por el divisor de haz y el medidor de potencia, se utiliza cuando se trabaja con el "Modo monitorización". Este modo consiste en la representación constante de la

potencia óptica tras el filtro neutro y permite controlar variaciones de las misma mediante comunicación VISA, a través de los drivers del medidor de potencia. En caso contrario (“Modo directo”), este bloque se sustituirá por una fibra colectora o por la fibra que se quiere analizar.



- Elemento óptico
- Elemento electrónico de control
- Instrumento de medida de fabricantes externos
- Tipo de comunicación

Fig. 3.6. Diagrama de bloques del sistema completo

### 3.3.2 Modificaciones sobre el control del motor

Como ya se ha comentado anteriormente, este trabajo parte de un trabajo previo, en el que se propone un sistema de control sencillo para el giro de un NDF. Mediante un teclado matricial 5x4, el usuario introducía un número de pasos que se mostraban en una pantalla OLED y se transmitían a un motor bipolar que, gracias al giro de la correa, rotaba el NDF. En este trabajo se ha partido de este diseño, pero se han introducido nuevas funcionalidades. En primer lugar, se ha cambiado el teclado 5x4 por un 4x4; se ha mejorado el algoritmo para trabajar con atenuaciones en lugar de pasos; y, por último, se ha añadido la opción de comunicación Serie con Matlab.

El programa está escrito en Arduino, por lo que el código consta de tres partes. En la primera, se declaran las librerías y las variables globales; a continuación, se realizan las configuraciones

previas del procesador y, por último, se ejecuta un bucle infinito con las funciones que el microprocesador deba estar ejecutando hasta que se apague. Adicionalmente, se incluye una cuarta parte con funciones que se ejecutan a lo largo del bucle. El código completo consta en el *Anexo V. Código desarrollado*. En la Fig. 3.7, se representa el diagrama de flujo del programa de Arduino.

En la primera parte del código, se han mantenido las librerías que se utilizaban en el proyecto anterior, que controlan el motor bipolar, el teclado y la pantalla OLED. Adicionalmente, se ha añadido la librería *Wire.h*, utilizada para realizar la comunicación serie con Matlab. A continuación, dentro de la configuración, se inicializa la comunicación serie, especificando la tasa de transmisión que se va a utilizar, se inicializa el teclado I2C y la pantalla OLED y se define la velocidad de giro del motor bipolar. El bucle consta de dos partes diferenciadas, que se ejecutan según se esté trabajando con la interfaz física del dispositivo o con la interfaz software.

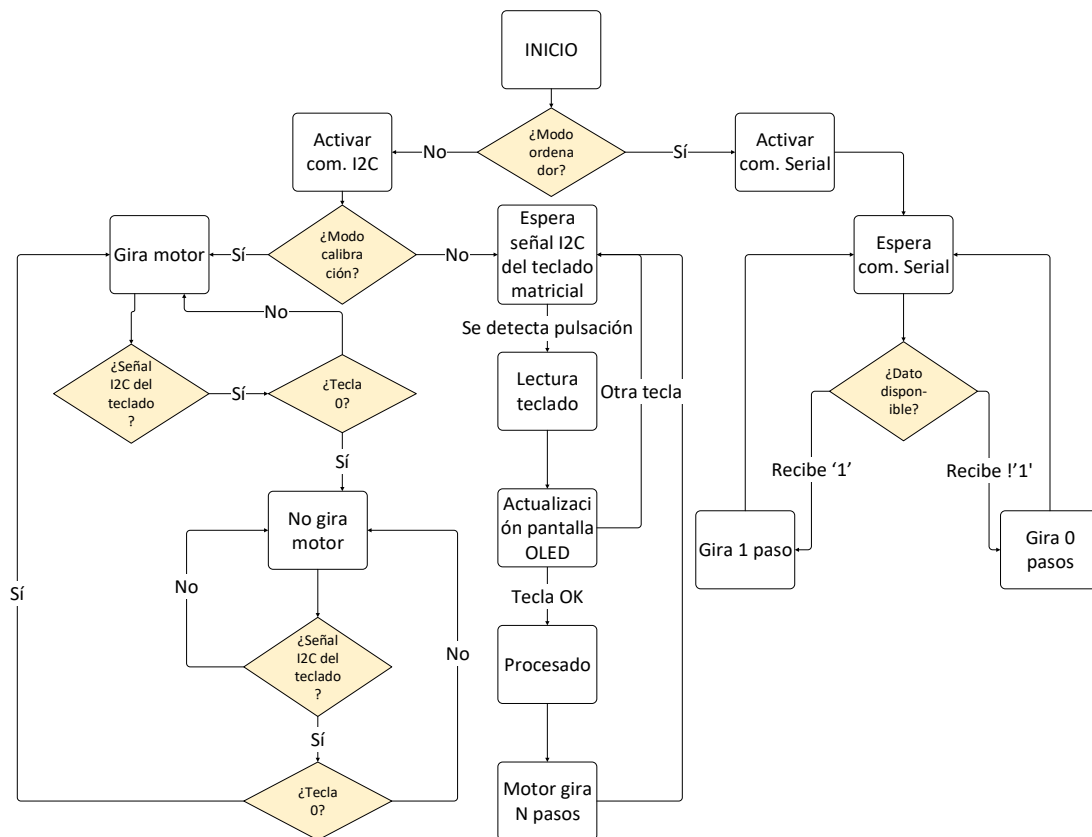


Fig. 3.7. Diagrama de flujo del programa de Arduino

Si trabajamos con la interfaz física, tenemos dos opciones: que esté activo el modo calibración del procesador o no. Este modo activa y desactiva el giro del motor cada vez que se pulsa la tecla 0 del teclado matricial. Es el modo de funcionamiento más básico, ya que no se puede controlar la atenuación introducida, está pensado para comprobar que el dispositivo funciona correctamente.

Si este modo está desactivado, el atenuador queda a la espera de recibir un dato del teclado matricial. Como se ha comentado, en este trabajo se ha usado un teclado 4x4 en lugar de un 5x4, cuya disposición se muestra en la Tabla 3.2.





|           |   |    |   |
|-----------|---|----|---|
| 1         | 2 | 3  |  |
| 4         | 5 | 6  |  |
| 7         | 8 | 9  |  |
| dB/lineal | 0 | OK |  |

Tabla 3.2. Disposición del teclado matricial

**Tecla OK.** Hace que se procese la atenuación que aparece en pantalla, realizando el cálculo de número de pasos que debe dar el motor para obtenerla.

**Tecla dB/lineal.** Esta tecla modifica la escala referida a la atenuación introducida. Al pulsar esta tecla cambiará la forma en la que es procesada la atenuación cuando se pulse el OK. Además se reseteará la atenuación que aparece en pantalla, dejando un valor por defecto (0dB, 1 unidades lineales).

**Teclas IZQUIERDA/DERECHA.** Se utilizan para desplazar el cursor a lo largo de la pantalla. La atenuación introducida es un número de cinco dígitos, y el cursor se posicionará sobre la cifra que se desee cambiar.

**Teclas ARRIBA/ABAJO.** Suben o bajan una unidad la cifra sobre la que se encuentre el cursor. Por ejemplo, si la atenuación en pantalla es 18.52dB, el cursor está en el 8 y se pulsa la tecla ARRIBA, la atenuación en pantalla pasará a ser 19.52dB.

**Teclas NUMÉRICAS.** Introducen el número seleccionado en la posición donde se sitúe el cursor.

Cuando se pulsa la tecla OK, se pasa a procesar la atenuación que aparece en pantalla. El número de pasos que debe dar el motor se calcula a partir de las curvas dadas por el fabricante del NDF (ecuación 1). Es importante que el NDF esté en la posición 0 al inicializar el programa para calcular los pasos de forma correcta en las siguientes iteraciones. Por último, los pasos son transmitidos al motor bipolar y se vuelve a esperar a un nuevo dato de atenuación.

Si trabajamos con la aplicación, en lugar de inicializar la comunicación I2C se iniciará la comunicación serial con el ordenador. Como en este caso procesado se realiza en una capa software superior, el control del motor desde el Arduino es muy sencillo. El puerto serie queda a la espera de recibir un char '1' para girar un paso el motor. En caso contrario, permanecerá parado.

La aplicación sobre el nivel superior, diseñada con Matlab App Designer, está basada en un algoritmo que es capaz de calcular los pasos que debe dar el motor para obtener la atenuación deseada por el usuario. Al ejecutarlo, se toma o se carga una medida de calibración inicial, que se realiza tomando una medida de potencia en cada paso de un giro de 360° (equivalente a 2048 pasos). De esta forma, conseguimos tener una función de potencia captada en función del ángulo de giro, que, tras normalizar al valor inicial, se convierte en una función de la atenuación. Además, se puede obtener la posición exacta en la que se encuentra el NDF en todo momento ya que en la posición 0° se pasa de tener la atenuación máxima del NDF a tener la atenuación mínima. Realizando la primera derivada a la curva de atenuación y buscando su máximo, podemos localizar en qué punto está el ángulo 0° y cuántos pasos ha dado el motor tras alcanzarlo.

Con esta medida de calibración, el algoritmo realiza el mapeo entre los pasos del motor y la atenuación, de forma que, a partir de un valor de atenuación introducido, el programa sea capaz de calcular el número de pasos que debe dar el motor y hacer que los ejecute mediante el envío de '1' en su comunicación serie.

### 3.3.3 Programas de control del medidor de potencia

En un nivel superior, el atenuador está controlado por una aplicación de Matlab. Desde este nivel superior se ejecutan tareas más complejas que, al ejecutarlas desde el propio microprocesador, podrían ralentizar el giro del motor. Así, el objetivo de esta aplicación es que el usuario sea capaz de interactuar de forma cómoda con el atenuador mediante la interfaz de usuario; establecer un intercambio de datos con el procesador, siendo capaz de enviar órdenes relacionadas con el control del motor desde la aplicación que puedan ser ejecutadas por el procesador; e interconectar distintos dispositivos de medida, de forma que sus parámetros de medida puedan ser parcialmente controlados desde la aplicación y sus resultados puedan ser procesados desde la aplicación.

El atenuador presenta un modo de trabajo con monitorización continua de la potencia que requiere, además de medir la potencia para poder ser mostrada en la interfaz de usuario, que se puedan ajustar los parámetros del medidor de potencia, como la longitud de onda, las unidades (lineales o logarítmicas), etc. desde la aplicación. La aplicación se ha diseñado para compatibilizar el modo monitorización con el medidor de potencia Thorlabs PM100USB, ya que ofrece la posibilidad de ser conectado al ordenador mediante USB.

Realizaremos la conexión con este dispositivo mediante comunicación VISA utilizando el driver PM100. Este driver, además de llevar a cabo la comunicación entre el medidor de potencia y el ordenador sobre el que se esté ejecutando el programa, incluye una serie de funciones que facilitan el control del dispositivo y que se describen en el *Anexo V. Código desarrollado*.

### 3.3.4 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario incluye diferentes opciones de configuración, así como múltiples modos de medida. En las Fig. 3.8 y Fig. 3.9. se muestran los dos menús de la interfaz de usuario.

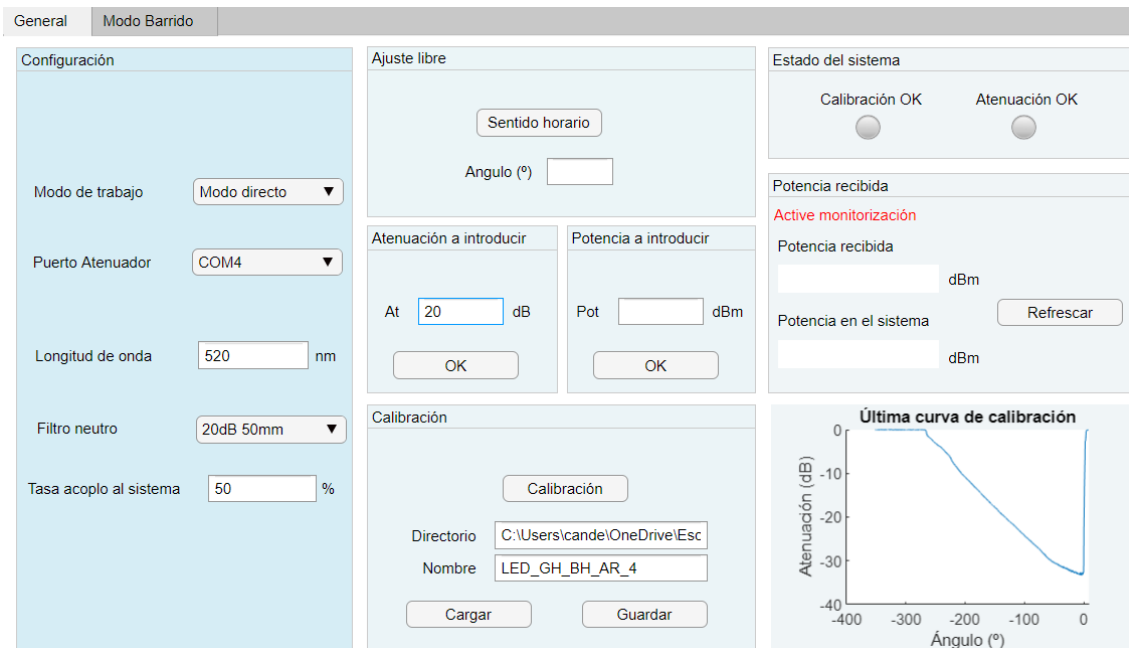


Fig. 3.8. Pestaña "General" de la aplicación diseñada mediante Matlab App Designer

En la parte izquierda del menú "General", nos encontramos la primera opción de configuración, que está relacionada con la selección del modo de trabajo. Por un lado, existe el modo directo, en el que el atenuador funciona sin monitorización continua de potencia y que requiere de una calibración previa, sobre la cual se registrarán todos los cálculos posteriores. Por otro lado, el modo monitorización consiste en incluir un divisor a la salida del filtro, con una de sus salidas conectada a un medidor de potencia para monitorización constante. Para controlar la potencia inyectada en el sistema, existe la opción de introducir la tasa de acoplo  $T$  entre la entrada y la salida al sistema óptico.

$$P_{\text{sistema óptico}} = P_{\text{medidor}} \cdot \frac{T}{100-T} \quad (3)$$

El resto de parámetros de configuración, como la longitud de onda o el tipo de NDF deben introducirse de forma previa a la calibración en ambos modos de trabajo.

En la parte central del menú, se muestran tres de los cuatro modos de ajuste de la atenuación. El primero es el ajuste libre, que consiste en basar el giro del NDF en los grados y que permite introducir atenuación de forma más rápida que en los otros modos. El segundo modo funciona como un atenuador convencional, en el que el usuario introduce un valor de atenuación y el algoritmo lo traduce en un número de pasos del motor bipolar. En el tercer modo de atenuación, se introduce la potencia óptica que se desea inyectar al sistema e, igual que en el modo anterior, se realiza el cálculo del número de pasaos que debe dar el motor bipolar para obtenerla. Por último, el cuarto modo, que se explicará más adelante, es el barrido, que se ejecuta desde la pestaña "Modo Barrido".

Existen varias opciones relacionadas con la calibración. Es posible cargar una curva de calibración de sesiones anteriores, algo útil en caso de no disponer de un medidor de potencia con el que tomar una calibración inicial. Por eso, el programa facilita la realización de calibraciones en cualquier momento, además de permitir guardarlas o importarlas.

Por último, en la parte derecha del menú, se muestra siempre la última curva de calibración registrada y en el modo de monitorización, se muestra también la potencia en el puerto de medida y la calculada en el otro puerto del divisor, entrante al sistema óptico.

El menú para el modo barrido se muestra en la Fig. 3.9 se ha diseñado con inspiración en las medidas de un parámetro determinado, como puede ser Voltaje de salida de un receptor o tasa de error de bit (BER), que varía en función de la potencia. Con este modo, el usuario puede fijar la atenuación inicial y la final, y el paso de atenuación. Además, permite introducir el valor medido del otro parámetro, realizando una gráfica de su evolución en tiempo real, y dando la posibilidad de guardar un archivo resultante que recoja esa medida. El barrido se puede iniciar y reiniciar con el botón “Iniciar” y se dará un paso cada vez que el usuario pulse “>>”.

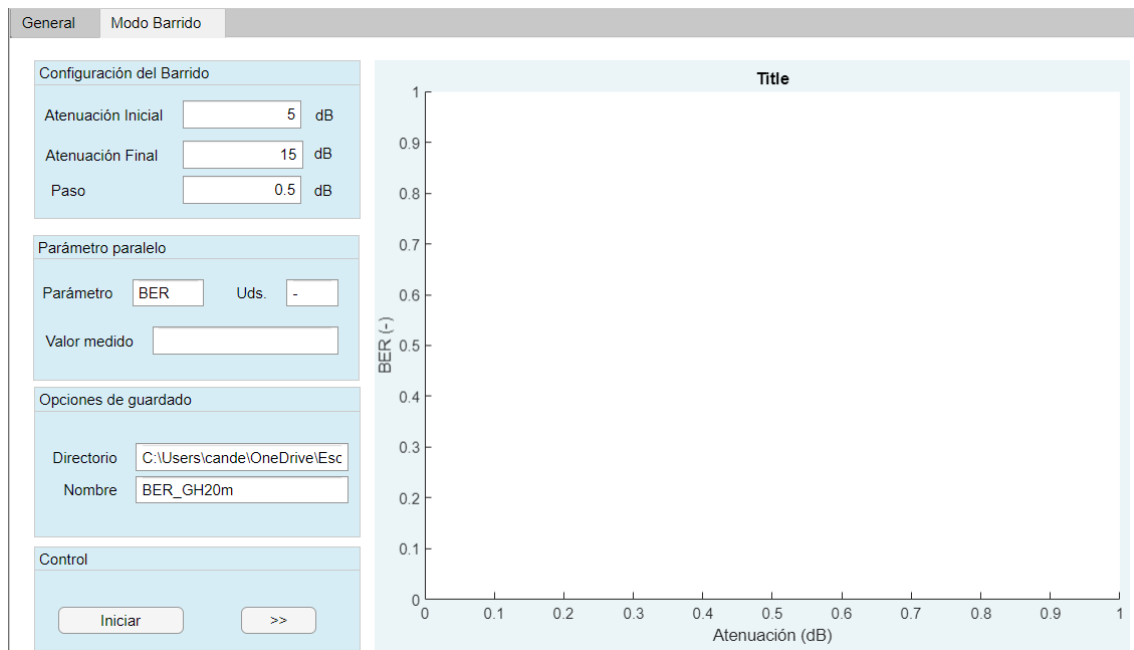


Fig. 3.9. Pestaña "Modo Barrido" de la aplicación diseñada mediante Matlab App Designer

## 4 Caracterización

La caracterización del sistema atenuador se ha llevado a cabo durante todo el periodo de realización de este trabajo. Como se trata de un diseño flexible, se han ensayado distintos elementos (filtros, acopladores, etc.) en configuraciones diferentes dependiendo de la aplicación desarrollada en cada fase. Este capítulo se va a organizar describiendo la caracterización del atenuador en sus dos modalidades.

En la modalidad de monitorización que utiliza un acoplador cuyas salidas se conectan al medidor de potencia óptica y al receptor, se obtendrán las pérdidas de inserción y el ensanchamiento que introduce en la distribución modal ya que éste puede afectar a la proporción de potencia que llega al receptor. Cuando el acoplador se utiliza en la modalidad sin monitorización, la fibra colectora será, generalmente una fibra parte del sistema óptico que se va a analizar y será necesario determinar, además, la modificación que impone el sistema atenuador a su respuesta frecuencial.

### 4.1 Caracterización del modo con monitorización

En este caso, se trabaja con la fibra lanzadera conectada a una fuente óptica y una de las entradas del acoplador enfrentada al atenuador. Las salidas del acoplador se conectan respectivamente al medidor de potencia y al receptor como muestra en la Fig. 3.4. De esta forma, esta modalidad ofrece una monitorización más precisa y continua de la potencia óptica recibida, pero por otro lado, presenta pérdidas de inserción más altas, debido a las pérdidas adicionales que introduce el acoplador. Por eso, se va a favorecer esta modalidad en la caracterización de dispositivos activos.

Como fuentes ópticas, se han utilizado dos láseres de semiconductor: LD650P007 (LD650) y LD520P050 (LD520, éste ya utilizado para obtener la curva de calibración), que emiten respectivamente en 650nm (rojo) y 520nm (verde). Ambos se instalan en una base LDMTM9\_M de Thorlabs que permite alimentarlos y modularlos. La intensidad eléctrica de alimentación se fija con un LDC205C también de Thorlabs.

Como fibra lanzadera, hemos seleccionado un tramo de 1m de fibra MH, debido a su baja apertura ( $NA = 0.3$ ) para reducir las pérdidas de inserción.

En principio, y de acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización previa de los acopladores disponibles, hemos seleccionado dos acopladores distintos: el IF541 y el IF542, con tasas de acoplo teóricas 80:20 y 90:10. Ambos cumplen el requisito de transmitir la mayor parte de potencia por uno de los puertos de salida, mientras que el otro puerto puede ser utilizado para tomar la medida de control.

Como receptores, se utilizarán los fotodetectores SPD-2 (SPD) y SPA-2 (SPA) de la marca Graviton, capaces de transformar la señal óptica al dominio eléctrico.

Las hojas de características de todos estos dispositivos y de la fibra lanzadera están disponibles en el *Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos*.

#### 4.1.1 Pérdidas de inserción.

Para caracterizar las pérdidas de inserción del sistema atenuador se mide inicialmente la potencia con el rabillo de fibra MH de 1m conectado al láser mediante un conector ST. Después, este rabillo se enfrenta al atenuador y en el otro extremo, se instala el extremo de entrada al acoplador. El extremo de salida del acoplador se conecta al medidor de potencia. La diferencia



de potencias ópticas en dB nos da las pérdidas de inserción del atenuador que, en esta modalidad, incluye las pérdidas del acoplador.

Se han realizado varias medidas con ambas fuentes, cambiando el segmento de fibra de lanzadera, la terminación de su extremos, la posición en el atenuador y, tras promediar estas mediadas, se han obtenido los siguientes valores mostrados en la Tabla 4.1.

| Acoplador utilizado | Potencia Referencia | Potencia tras el atenuador | Pérdidas de inserción | Longitud de onda |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| IF541               | 4.47dBm             | -1.22dBm                   | 5.69dB                | 520nm            |
| IF542               | 4.47dBm             | -1.11dBm                   | 5.58dB                | 520nm            |
| IF541               | 1.96dBm             | -2.6dBm                    | 4.56dB                | 650 nm           |
| IF542               | 1.96dBm             | -2.97dBm                   | 4.93dB                | 650nm            |

Tabla 4.1. Pérdidas de inserción del atenuador óptico con el montaje experimental FIBRA MH 1,5m + NDF40AR

Las pérdidas de inserción, en media, son de unos 5dB, aunque obtenemos pérdidas mayores en el caso de trabajar con señales en 520nm, fenómeno motivado por la variación del tratamiento antirreflejante del NDF con la longitud de onda.

Aunque en principio estas pérdidas de inserción puedan parecer elevadas, no lo son tanto si se comparan con otras tecnologías de atenuación. En la caracterización del acoplador de bloqueo se obtuvieron pérdidas de inserción entre 4.7 y 6 dB dependiendo del tipo de fuente utilizada [10]. A estas pérdidas, además, habría que añadir las correspondientes a la conexión con el acoplador, por lo que queda clara la ventaja del presente diseño.

#### 4.1.2 Ensanchamiento de la distribución de potencia

Como ya se ha dicho, en el modo con monitorización un elemento fundamental es el acoplador. Los acopladores IFO son acopladores específicos para POF que se fabrican uniendo dos tramos cortos de fibras por fusión. En la zona de contacto, la potencia se transfiere en distinta proporción de una fibra a otra de forma que, según la entrada, se distribuye de distinta forma en cada una de las salidas. Aunque en las hojas de características aparece una proporción nominal de acoplo entre salidas (90/10, 80/20, 50/50) este valor es sólo indicativo y es necesario caracterizar cada ítem ya que sus valores varían bastante de uno a otro. En el *Anexo II. Caracterización de acopladores*, se presentan los resultados de la caracterización de ítems de los modelos IF541 (80/20) y IF542 (90/10).

Para elegir los puertos de trabajo (entrada y salida) de los acopladores seleccionados se ha seguido el criterio de que produzcan el menor ensanchamiento posible de la distribución angular de intensidad. Este ensanchamiento puede afectar a la proporción de potencia captada por el detector si éste tiene un área activa pequeña o el acoplo se realiza mediante lentes con una determinada apertura numérica ya que en ambos casos se producirá un filtrado de la luz que sale de la fibra con ángulos altos.

Además de seleccionar las salidas del acoplador, vamos a ver como afecta el sistema completo a la distribución de intensidad, comparándola a la entrada y a la salida del sistema atenuador. El objetivo es comprobar si el atenuador introduce cambios en la distribución espacial del sistema, y en su caso, cuantificarlos.

Para obtener la distribución espacial de intensidad obtendremos las imágenes del patrón de campo lejano (Far Field Pattern, FFP), utilizando un sistema experimental del laboratorio. El componente principal es una cámara conectada al ordenador que apunta con un ángulo de 45° a una pantalla de papel blanca. Esta pantalla refleja el haz de luz emitido por el extremo de una fibra situado a una distancia conocida (en este caso, 7.5 cm). Así, la cámara recoge este reflejo y se realiza el procesado correspondiente para obtener la distribución de intensidad en función del ángulo. El procedimiento completo de registro y procesado está automatizado mediante el programa “Medidas\_Angulares” que permite adquirir series de imágenes que después serán promediadas. Tanto el sistema experimental como el programa se describen brevemente en el *Anexo IV. Sistemas Experimentales*.

A partir de la distribución de intensidad, se puede obtener la EAF (Encircled Angular Flux) a partir de la siguiente relación [16].

$$EAF(\theta) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\theta I(\theta') \frac{\text{sen}(\theta')}{\text{cos}^3(\theta')} d\theta' d\varphi'}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{\text{máx}}} I(\theta') \frac{\text{sen}(\theta')}{\text{cos}^3(\theta')} d\theta' d\varphi'} \quad (4)$$

La EAF nos da el cociente del flujo de radiación dentro de un ángulo sólido dado, y el flujo total. En nuestro caso, esta función nos permite conocer qué proporción de potencia óptica sale de la fibra dentro de un cono con un ángulo determinado. De esta manera, permite saber la potencia relativa que puede captar un detector con un área o una apertura numérica determinadas.

Para cuantificar el ensanchamiento obtenemos, en primer lugar, una medida de referencia, conectando al láser LD650 el tramo de fibra de lanzadera y enfrentando el extremo de salida a la pantalla del sistema de registro de imágenes de FFP. En segundo lugar, introducimos el sistema atenuador poniendo el extremo de salida de la fibra de lanzadera a un lado del filtro y al otro, uno de los puertos de entrada del acoplador que se alinea con la fibra lanzadera utilizando los tornillos micrométricos XYZ. El puerto de salida con la mayor proporción de potencia se enfrenta a la pantalla para realizar el registro de imágenes de FFP.

En Fig. 4.1, se muestran las EAFs obtenidas para el atenuador con ambos acopladores y dos combinaciones de puertos de entrada y salida. Además, se han representado la EAF referencia obtenida sólo con la fibra lanzadera y la obtenida sólo con el acoplador. En cada condición se han promediado al menos 15 imágenes de FFP.

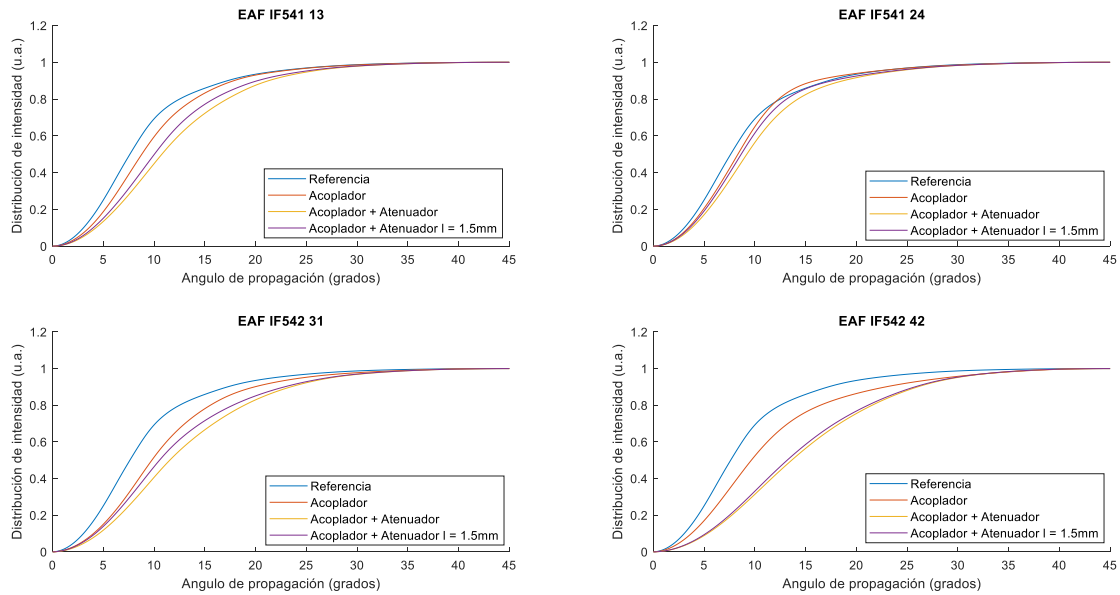


Fig. 4.1. Comparación de EAF utilizando distintos acopladores con distintos puertos de entrada y salida

La figura muestra que el efecto sobre la distribución de potencia depende del acoplador y de los puertos seleccionados y que, normalmente, hay un efecto de ensanchamiento adicional producido por el atenuador. Por otra parte, para analizar el efecto de la separación de las fibras, se ha introducido un desalineamiento extra de 1.5 mm comprobando que no produce ensanchamiento adicional sino que efecto es estrechar ligeramente la EAF.

De los acopladores analizados, el más favorable (IF541 24) produce un ensanchamiento de la EAF al 50% de sólo 1.5° (pasando de 7.65° para la referencia a 9.21° para el sistema completo). El ensanchamiento máximo al 50% se da para el acoplador IF542 42 donde la EAF al 50% es de 15.5° lo que supone un ensanchamiento de 8°. Aunque comparado con el ensanchamiento introducido por el IF541 este puede parecer grande, no lo es tanto si se compara con otras tecnologías de atenuación. Un ejemplo es un atenuador de bloqueo que se ha caracterizado en trabajos anteriores. Las EAFs obtenidas inyectando directamente con el láser LD650 para distintas atenuaciones se muestran en la Fig. 4.2.

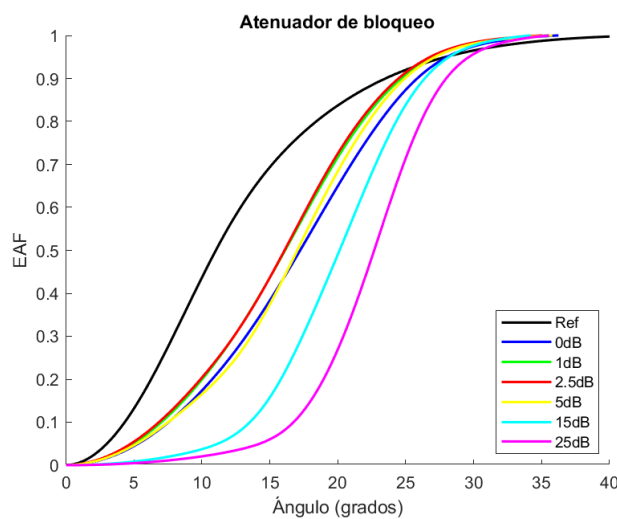


Fig. 4.2. Curvas de EAF para el atenuador de bloqueo en función de la atenuación, con láser LD650

En este atenuador, la anchura al 50% pasa de ser 9° para la referencia a 17° para atenuaciones hasta 5 dB, pero es de 20° para 15dB y llega hasta 22° en las más alta. Por otra parte, En la figura, se pone de manifiesto la mayor ventaja del diseño basado en el filtro neutro que es que la distribución espacial es la misma para todos los valores de la atenuación.

## 4.2 Caracterización del modo sin monitorización

En caso de querer caracterizar fibras de mayor longitud como parte del sistema óptico, será preferible trabajar en modo sin monitorización para reducir las pérdidas, utilizando la fibra que se quiere analizar directamente como fibra colectora. Como no se tiene una medida continua de la potencia, es necesario realizar una pre-calibración en la que el programa se basará para calcular los valores de atenuación y potencia recibidos.

Como hemos dicho, en esta modalidad, es necesario caracterizar las pérdidas de inserción y el ensanchamiento de la EAF, pero también la respuesta en frecuencia. Para ello, hemos elegido una configuración en la que el atenuador se va a insertar próximo al transmisor y se van a estudiar los efectos sobre la EAF y la respuesta en frecuencia de fibras de 20 metros de distintas aperturas numéricas. Estas fibras son la MH, GH y BH con aperturas de 0.3, 0.5 y 0.6 (hojas de características en el Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos)

Este caso se ha elegido porque responde a la configuración elegida en algunas de las aplicaciones del sistema atenuador que se presentarán en el próximo capítulo. Además, la presencia de este sistema cerca de transmisor uniformiza la inyección del láser (normalmente con muy alta variabilidad [17]) por lo que al realizar comparaciones entre distintas fibras, estas se darán en condiciones similares lo que es una ventaja adicional. Por otra parte, la longitud de 20 metros es una longitud habitual en las aplicaciones de POF en enlaces de transmisión y lo suficientemente corta para que los posibles cambios introducidos por un dispositivo localizado en el extremo de inyección tengan consecuencias en el comportamiento del sistema.

El atenuador diseñado ofrece la flexibilidad de poder usarse en otros puntos del enlace (por ejemplo, próximo al receptor), con fibras más cortas o más largas, etc. En cada configuración, habría que cuantificar sus efectos antes de sacar conclusiones sobre los resultados obtenidos.

### 4.2.1 Pérdidas de inserción

El procedimiento para obtener las pérdidas de inserción en este modo de trabajo es similar al que hemos estudiado para el modo directo. La diferencia es que, en este caso, al medir la potencia del sistema completo, en lugar de colocar el acoplador tras el atenuador, se colocará una fibra colectora, una BH de 2.5 m (elegida por su mayor apertura). En su otro extremo, se conectará al medidor de potencia.

Al igual que en la caracterización de las pérdidas de inserción en el modo monitorización, se han realizado varias medidas con ambas fuentes, cambiando el segmento de fibra de lanzadera, la terminación de su extremos, la posición en el atenuador y, tras promediar estas mediadas, se han obtenido los valores recogidos en la Tabla 4.2:

| Fibra colectora | Potencia Referencia | Potencia tras el atenuador | Pérdidas de inserción | Longitud de onda |
|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| BH 1.5m         | 4,47 dBm            | 0,08 dBm                   | 4,39 dB               | 520 nm           |
| BH 1.5m         | 1,96 dBm            | -2,02 dBm                  | 3,98 dB               | 650 nm           |

Tabla 4.2. Pérdidas de inserción del atenuador óptico con el montaje experimental FIBRA MH 1,5m + NDF40AR

En este caso, al prescindir de las pérdidas de inserción adicionales que introduce el acoplador, se han obtenido pérdidas más bajas. La pérdida de inserción, en media, es de 4.15 dB. De nuevo, obtenemos pérdidas mayores en el caso de trabajar con luz de 520 nm.

En este caso, se han obtenido también las pérdidas de inserción utilizando otro modelo de filtro sin antirreflejante (NDF40), comprobando que, efectivamente, la capa antirreflejante supone pérdidas de inserción menores. Manteniendo las mismas condiciones, con el láser LD520, se han obtenido pérdidas de inserción de 5.54 dB. Como vemos, al no utilizar el filtro con antirreflejante, las pérdidas de inserción se han incrementado más de 1 dB.

#### 4.2.2 Ensanchamiento de la distribución de potencia

Se sigue un procedimiento similar al realizado para cuantificar el ensanchamiento de la distribución espacial. En este caso se toma como referencia la EAF obtenida inyectando el láser directamente a los 20 metros de fibra y se compara con la EAF obtenida insertando el atenuador. Es decir, conectando al láser la fibra lanzadera y utilizando como colectora la fibra de 20 metros. Las medidas se han realizado varias veces cambiando la inyección para cuantificar la variabilidad. Los resultados para 3 tramos de 20 metros de fibras de diferentes aperturas numéricas (MH con apertura 0.3, una GH (NA = 0.5) y una BH (NA = 0.6)) se muestran en la siguiente figura.

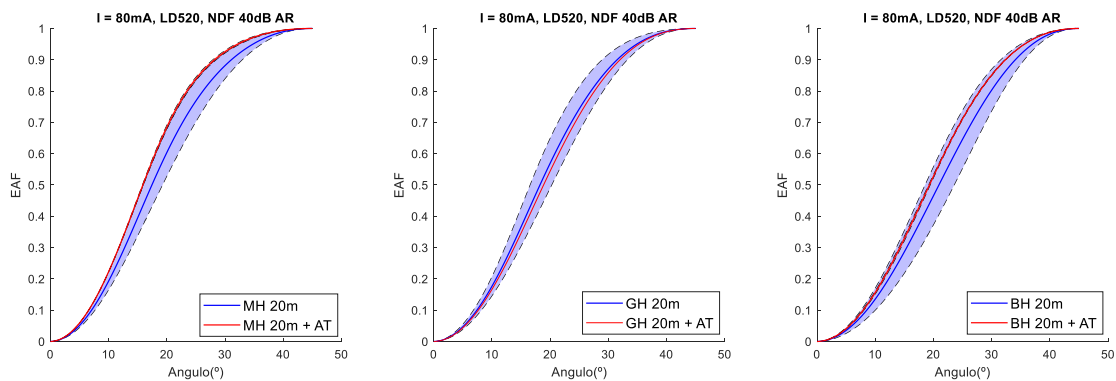


Fig. 4.3. Curvas de EAF para los sistemas con las fibras MH, GH y BH, comparando los sistemas con y sin atenuador

Los resultados obtenidos muestran que el efecto del atenuador en la EAF está dentro de la variabilidad. De hecho, vemos que tanto para la MH como para la BH el efecto del atenuador produce una anchura por debajo de la media. Es también llamativo que en los tres casos el uso del atenuador en inyección reduzca la variabilidad, lo que se explica por la uniformización de la inyección al introducir el atenuador.

#### 4.2.3 Respuesta en frecuencia

El filtro neutro no puede modificar por sí mismo la respuesta en frecuencia del sistema, ya que sólo introduce una atenuación variable. En un sistema donde las longitudes de las fibras utilizadas como lanzadera y colectora son lo suficientemente cortas para despreciar la dispersión que introducen, la respuesta en frecuencia de este sistema no se verá afectada. Por ello, esta configuración puede ser utilizada para obtener las respuestas en frecuencia de referencia, evitando la saturación del detector en el caso de fuentes de alta emisión, como veremos en el próximo capítulo. Sin embargo, cuando se utiliza con fibras de una determinada longitud, sí que puede modificar de forma indirecta la respuesta en frecuencia del sistema. Las características de las POFs las hacen particularmente sensibles a las condiciones de acoplo tanto en la inyección como en la detección, así como a la presencia de elementos o perturbaciones que cambian la distribución de intensidad en un punto localizado de la fibra (como conectores,

curvaturas, etc.) [18] [19] [20]. Al alterar la distribución de intensidad que se propaga por la fibra, producen mezcla o filtrado de modos que puede llevar a un cambio en la respuesta en frecuencia de la misma como se ha demostrado en trabajos previos [21].

En este caso, observaremos los cambios que introduce el atenuador óptico variable en la respuesta en frecuencia de una fibra de 20 metros cuando se coloca en el extremo de inyección de forma similar a como se hizo en el apartado anterior con las EAFs. Para ello, se realizarán dos medidas de respuesta en frecuencia distintas, que nos permitirán comparar el efecto que introduce el atenuador en la respuesta en frecuencia: primero se obtendrá la respuesta en frecuencia de la fibra de 20 metros con inyección directa del láser y después, la respuesta de la fibra precedida por el atenuador, donde el sistema óptico estará compuesto por la fibra lanzadera, seguida por el NDF, y tras él, la fibra de 20m.

La respuesta en frecuencia de una fibra se obtiene a partir del parámetro  $s_{21}$  (que es el cuadrado de aquella) utilizando un analizador vectorial de red VNA (Vector Network Analyzer) modelo E5071C de Agilent. Para obtener el parámetro  $S_{21}$ , se conecta el puerto 1 del VNA a la entrada de modulación del láser y la de salida del receptor al puerto 2 del VNA. El VNA puede ser controlado a través de un programa que permite fijar parámetros y guardar las medidas del  $S_{21}$  como vectores de Matlab en un PC (el entorno se describe brevemente en el Anexo IV. Sistemas Experimentales).

Como la medida de la respuesta en frecuencia obtenida incluye también las limitaciones introducidas por la electrónica del sistema, es decir, del receptor y del transmisor es necesario cuantificarlas tomando una medida de referencia, que refleje únicamente la electrónica del sistema. Esta medida se obtiene conectando el transmisor y el receptor mediante un tramo muy corto de fibra (entre 1 y 2 metros de longitud), de forma que los efectos de dispersión que pueda introducir sean despreciables. Las referencias se toman antes de comenzar cada sesión de medida para mantener las mismas condiciones que se detallan en la Tabla 4.3. De esta forma, la respuesta en frecuencia de la fibra en dB se obtiene como:

$$H(f)_{fibra\ 20\ m} = H(f)_{sist.completo} - H(f)_{referencia} \quad (5)$$

Las condiciones de medida para este montaje son las siguientes:

| Elemento             | Nombre                   | Parámetros en el experimento                        |
|----------------------|--------------------------|---|
| VNA                  | E5071C de Agilent        | Amplitud RF: -10dBm, BW = 5kHz                      |
| Láser                | LD520                    | Longitud de onda: 520nm                             |
| Fuente de intensidad | LD520P050 de Thorlabs    | Intensidad: 80mA                                    |
| Fibra lanzadera      | MH                       | Longitud 1.5m                                       |
| Fibra colectora      | BH                       | Longitud: 2.5m                                      |
|                      | MH, GH, BH               | Longitud 20m. NA MH = 0.3, NA GH = 0.5, NA BH = 0.6 |
| Atenuador            | NDC-50C-4M-AR Thorlabs   | Atenuación: 0dB                                     |
| Detectores           | SPD-2, SPA-2 de Graviton | NA SPA = 0.5, NA SPD = 0.25                         |

Tabla 4.3. Condiciones de medida para el cálculo de la respuesta en frecuencia

El experimento ha sido realizado con dos detectores diferentes: el SPA, que tiene una mayor apertura (0.5) pero soporta un menor ancho de banda (1 GHz), y el SPD, que presenta un ancho de banda mayor (1.2 GHz) pero una menor apertura (0.25). Los resultados se muestran en Fig. 4.4 y Fig. 4.5.

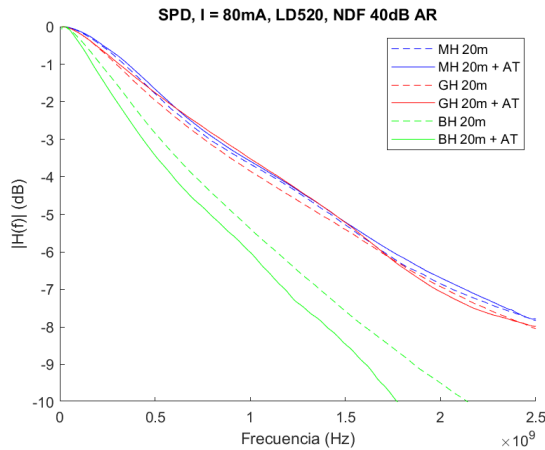


Fig. 4.4. Respuesta en frecuencia de las fibras de 20m con atenuador y sin atenuador, con receptor SPD

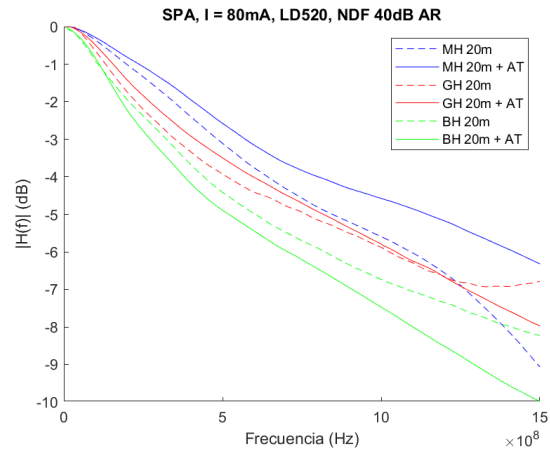


Fig. 4.5. Respuesta en frecuencia de las fibras de 20m con atenuador y sin atenuador, con receptor SPA

A pesar del distinto ancho de banda de los receptores, una vez normalizada con la referencia obtenida con la fibra corta, la respuesta en frecuencia de la fibra debería de ser la misma. Sin embargo, el efecto combinado de la dispersión modal de la fibra y la diferente apertura de los detectores hace que existan diferencias entre ambas medidas. La dispersión modal afecta de manera que la luz que se propaga con ángulos mayores, tiene mayores retardos que producen ensanchamiento de la respuesta al impulso y la consiguiente degradación de la respuesta en frecuencia. La potencia óptica de estos modos de alto orden se elimina cuando la apertura del detector es baja, como en el caso del SPD que sólo capta la potencia en un cono de hasta 15°, produciendo una mejora de la respuesta en frecuencia. Con los datos proporcionados por las EAFs tomadas en el apartado anterior, vemos que, el porcentaje de potencia captado en 15° es menor del 30% en todos los casos lo que indica que se produce un filtrado de potencia considerable. Además, como el valor de las EAFs obtenidas en los casos con atenuador y sin atenuador para 15° es similar, no existe apenas diferencia entre la respuesta frecuencial con y sin atenuador para el SPD. El SPA, sin embargo, es capaz de captar hasta 30° lo que supone más del 90% de la potencia propagada por la fibra. Esta potencia se transmite por ángulos más altos que tienen mayores retardos y producen una mayor degradación. Por ello, la respuesta en frecuencia de la fibra con el SPA es más baja que la medida con el SPD (en la figura, la escala en frecuencia es diferente para cada detector). Además, tiene mayor variabilidad y por ello, existen más diferencias entre los dos casos.

## 5 Aplicaciones

Durante el desarrollo de este trabajo, se han realizado experimentos utilizando la versión del atenuador disponible para detectar posibles fallos y realizar mejoras tanto en la configuración de los elementos como en el entorno de programación. En estos experimentos se han utilizado ambos modos de trabajo por lo que en este capítulo se describen siguiendo esta clasificación.

### 5.1 Modo de monitorización

El modo monitorización ofrece una medida continua y precisa de la potencia óptica en el sistema por lo que es el modo idóneo en la caracterización de detectores o fuentes ópticas como las que se describen a continuación. En primer lugar, se describirá el proceso de obtención de la curva de eficiencia de dos detectores, el SPA y el SPD de Graviton. En segundo lugar, se caracterizará una fuente óptica, la LD520 de Thorlabs, a partir de su parámetro S21 y el BER obtenidos con el SPD.

#### 5.1.1 Caracterización de la curva de eficiencia del detector

Algunos detectores utilizados con fibras de PMMA de 1mm no son específicos para ellas, sino que están diseñado para fibras de plástico perfluorinadas o incluso para fibras multimodo de vidrio, ambas de menor tamaño y apertura. Este es el caso de los detectores de Graviton SPD y SPA que tienen lentes de apertura 0.25 y 0.5 que limitan la potencia que llega a la zona activa. Por otra parte, estos detectores tienen buenas prestaciones de ancho de banda y sensibilidad y han dado buenos resultados en sistemas de transmisión con PMMA POF de 1mm [22]. Por ello, se hace necesario obtener un valor realista de la curva de eficiencia del detector para estas fibras obteniendo el voltaje de salida del detector frente a la potencia recibida ya que los valores que se dan en las hojas de características se obtienen con otro tipo de fibras y difieren considerablemente cuando se utiliza con POFs.

En el experimento hemos utilizado el atenuador para modificar la potencia recibida, obteniendo las curvas para los dos detectores con dos láseres: el LD520 y el LD650 que emiten respectivamente en 520 nm y 650 nm. La fuente óptica se conecta a la fibra lanzadera y como fibra colectora se utiliza el puerto 4 del acoplador IF541. El filtro en este experimento es el NDF20dB Se ha realizado un barrido de la potencia óptica medida con el fotodetector de Thorlabs conectado al puerto 1, obteniendo simultáneamente el voltaje de salida del detector conectando su salida RF a un osciloscopio Infinium DCA86100A de Agilent. La disposición de los distintos elementos se muestra en la siguiente figura.

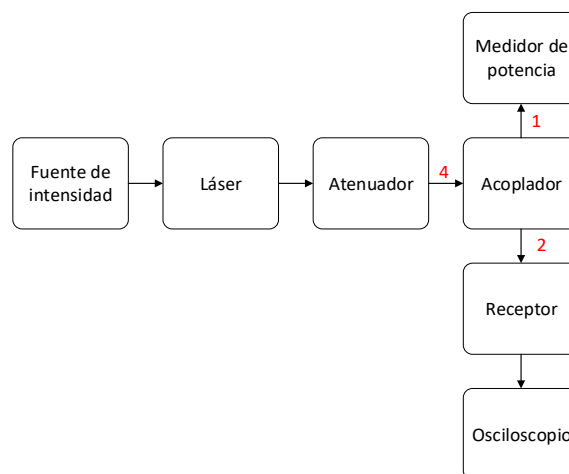


Fig. 5.1. Esquema del montaje experimental del sistema de caracterización de detectores



Las Fig. 5.2 y Fig. 5.3 muestran los resultados obtenidos comparados con la recta de eficiencia para fibra multimodo de vidrio obtenida a partir de los valores disponibles en las hojas de características de los detectores (*Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos*). La diferencia de las pendientes de eficiencia obtenidas con el LD650 (687.56 V/W para el SPD y 819.68 V/W para el SPA) está de acuerdo con los distintos valores de apertura de ambos detectores. Para el LD520, sin embargo, ambas pendientes son más similares (378.07 V/W y 391.62 V/W), siendo más bajas que para 650 nm debido a la menor responsividad del detector en 520 nm.

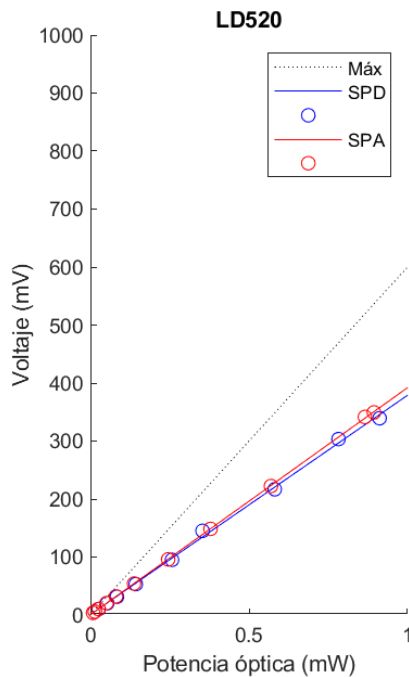


Fig. 5.2. Curvas de eficiencia del SPD y del SPA para 520nm

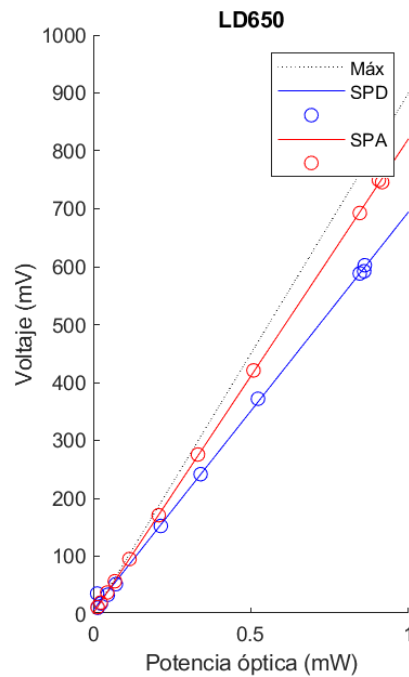


Fig. 5.3. Curvas de eficiencia del SPD y del SPA para 650nm

### 5.1.2 Caracterización de fuentes ópticas

Antes de utilizar un láser como transmisor en un sistema de comunicaciones, hay que fijar su punto de operación o intensidad de corriente de bias que es sobre la que se aplicará la modulación. Para ello, hay que tener en cuenta la curva característica del láser o curva de intensidad-potencia para que la intensidad de operación no esté ni cerca de la intensidad umbral ni de la máxima recomendada [22]. Además, la respuesta en frecuencia del láser (y, por tanto, del sistema del que forma parte) cambia con la intensidad de corriente aplicada. Para seleccionar la opción más ventajosa, una vez determinado el rango de operación, se obtiene la respuesta en frecuencia del sistema formado por el láser y un determinado detector para varios valores de la intensidad de corriente. Para ello, es necesario unir el transmisor y el receptor mediante una fibra suficientemente corta como cuando se obtuvo la referencia para la obtención de la respuesta en frecuencia de una fibra.

Estas medidas permiten determinar las propiedades del sistema electro-óptico y fijar la intensidad de operación en el punto más favorable según la aplicación.

El láser LD520 es una fuente óptica de alta emisión (50 mW, antes de acoplo a fibra) cuya intensidad de corriente umbral son 45 mA y a la que, como máximo, se le pueden aplicar 160 mA (*Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos*). El problema que surge en

la caracterización de esta fuente cuando se empareja con uno de los detectores de Graviton es que, a pesar de su menor responsividad en la región del verde, éstos tienen potencias ópticas de saturación relativamente bajas (3 mW, 4.8 dBm) y no es posible medir directamente la respuesta en frecuencia a partir de 90-100 mA. Por ello, es necesario el uso del atenuador que permite controlar que la potencia recibida por el detector esté por debajo de la de saturación y obtener la respuesta en frecuencia del sistema para intensidades de operación altas. En este experimento se ha utilizado la misma configuración del atenuador que en el apartado anterior (Fig. 5.1).

La respuesta en frecuencia del sistema con el LD520 como fuente y el SPD como detector, obtenida a partir del S21 para intensidades de operación desde 80 a 160 mA se muestra en la Fig. 5.4. La figura muestra que la respuesta para 80 mA es la más alta hasta 1.5 GHz pero, a partir de esta frecuencia, desciende con mayor pendiente que las de 90 mA y 100 mA. En este caso, no está claro cual de estos puntos de operación permitirá una mejor transmisión.

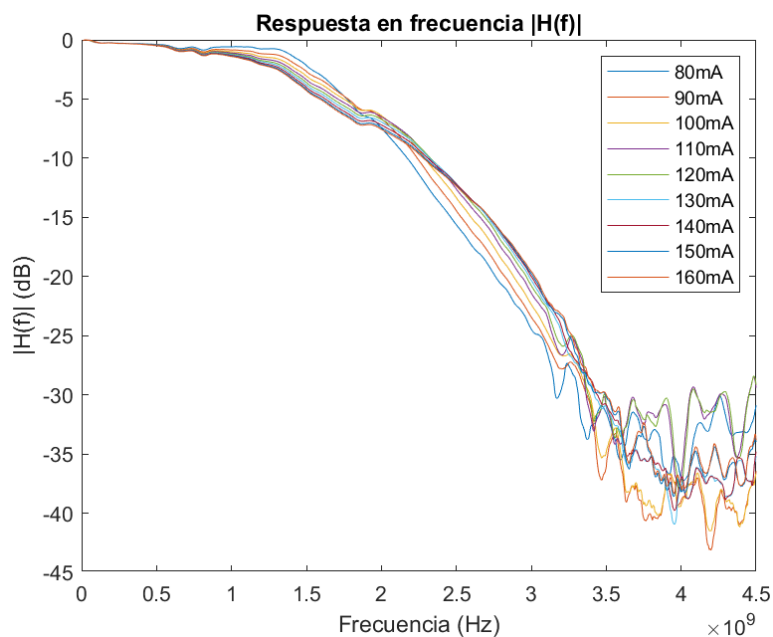


Fig. 5.4. Respuesta en frecuencia del sistema medido para distintas intensidades con el detector SPD

Otra forma de determinar cual es el punto de operación más favorable es estudiar la tasa de error de bit (BER) en función de la tasa de transmisión. Lo esperable es que, una mejor respuesta en frecuencia del sistema de lugar a tasas más altas para el mismo valor de BER, pero en este caso también influye la potencia óptica recibida.

Por eso, es conveniente determinar el comportamiento del sistema obteniendo las llamadas “curvas back-to-back”, que se realizan en condiciones en las que la fibra necesaria para unir el transmisor y el receptor no impone limitación ni por su atenuación ni por su dispersión. De nuevo, en este tipo de caracterización es necesario evitar la saturación del detector, por lo que se han realizado utilizando el atenuador y monitorizando la potencia recibida. Los resultados se representan en la Fig. 5.5 y en la Tabla 5.1.

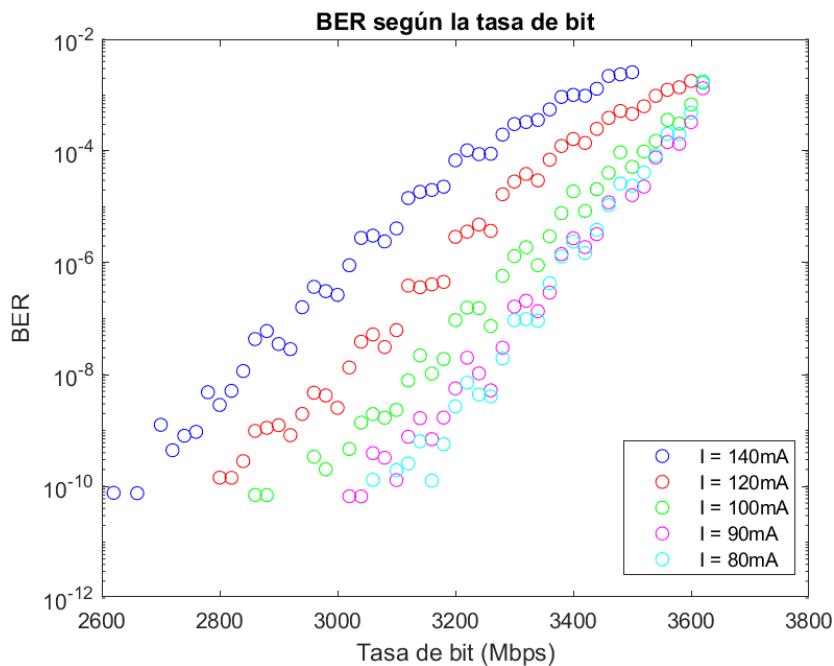


Fig. 5.5. BER en función de la tasa de bit para distintas intensidades

| Intensidad (mA) | Potencia P4 (dBm) |
|-----------------|-------------------|
| 140             | 0,19              |
| 120             | -0,55             |
| 100             | -1,54             |
| 90              | -2,25             |
| 80              | -3,06             |

Tabla 5.1. Potencia inyectada al sistema según la intensidad de la fuente

Observamos que, a partir de 100 mA, tenemos curvas de BER mejores (menor error para mayor tasa de bit) cuando disminuimos la intensidad. Sin embargo, la curva para 90 mA es ligeramente mejor que la de 80 mA por encima de 3.4 Gbps. Para determinar si esta ventaja es debida a las diferencias en la respuesta en frecuencia o a la mayor potencia recibida en el caso de 90 mA, aprovechamos el atenuador para repetir la medida con punto de operación de 90 mA, pero ajustando la potencia recibida para que sea la misma que con 80 mA (-3 dBm). Los resultados, mostrados en la Fig. 5.6, revelan que, con la misma potencia, la curva para 90 mA está algo desplazada hacia tasas menores, por lo que determinamos que 80 mA es el punto de operación óptimo para este sistema. Aunque en este caso, las diferencias entre ambos puntos de operación son muy pequeñas, pueden darse otros en los que el estudio llevado a cabo con el atenuador sea fundamental para determinar cuál de ellos es el óptimo.

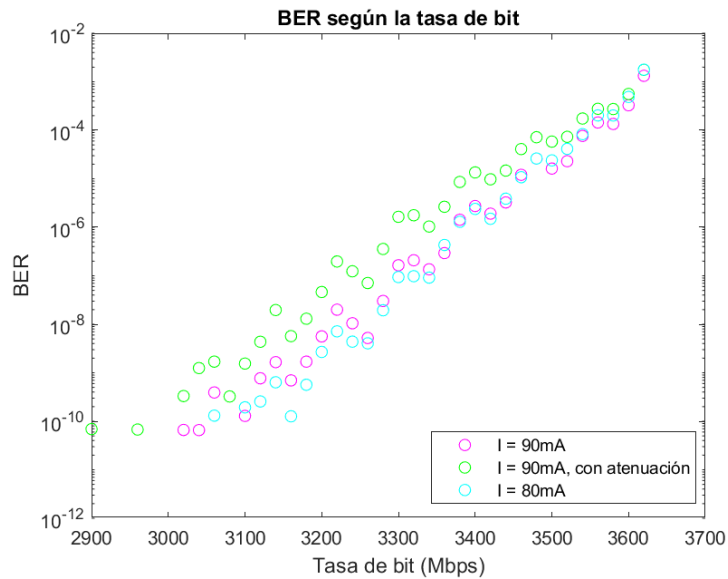


Fig. 5.6. Tasa de bit para distintas intensidades. En este caso, se iguala la potencia inyectada en el sistema entre los casos de 80mA y 90mA introduciendo atenuación

## 5.2 Modo sin monitorización

El modo sin monitorización puede ser utilizado en caracterizaciones de fibras largas, debido a las bajas pérdidas de inserción y mínimo ensanchamiento que introduce. En las aplicaciones que se presentan aquí se ha optado por situar el atenuador en el extremo del sistema próximo al emisor de forma que, además, se consigue igualar las condiciones de inyección de todas las fibras analizadas. Como se ha comentado antes, otras configuraciones requerirán una caracterización previa como se ha hecho en el capítulo anterior.

### 5.2.1 Comparación de BER vs tasa de transmisión

En esta aplicación se realiza una comparación de la capacidad de transmisión de tres fibras de igual longitud (20 metros) con distintas aperturas numéricas, utilizando el mismo sistema (láser LD520 y detector SPA) para medir el BER en función de la tasa de transmisión utilizando el atenuador para igualar la potencia recibida

El BER para una determinada tasa de bit depende de la potencia recibida y de la respuesta en frecuencia del sistema (incluyendo la fibra). En comunicaciones, se suele fijar una calidad mínima de error (por ejemplo,  $10^{-6}$ , o  $10^{-3}$  si el receptor incluye corrección de errores a posteriori) y bajar la tasa de transmisión para conseguirla. Las fibras consideradas en este experimento tienen, además de diferente NA, distintos valores de atenuación. Por tanto, aunque su longitud es la misma, la potencia recibida en el detector será diferente para cada una de ellas lo que influirá en el BER. Para compararlas en igualdad de condiciones, vamos a obtener el barrido de BER frente a tasa de transmisión utilizando el atenuador para igualar el voltaje producido en el detector. Se ha decidido igualar en voltaje en lugar de potencia óptica recibida para evitar diferencias debidas al recorte de potencia debido a la limitación que impone la apertura del detector.

El esquema del sistema experimental utilizado se muestra en la Fig. 5.7. El atenuador se ha situado en el extremo de inyección, conectando la fibra lanzadera al láser para mantener las mismas condiciones de inyección en todas las fibras. La potencia inyectada se reduce ajustando el atenuador para obtener el valor deseado de voltaje recibido que se mide conectando el detector al osciloscopio.

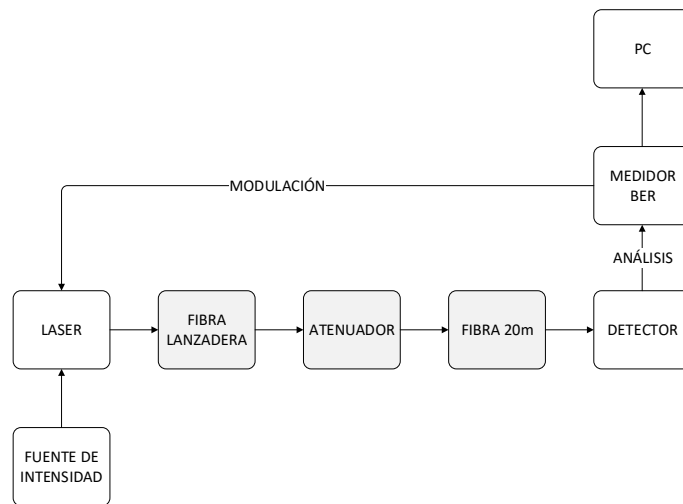


Fig. 5.7. Montaje para la media de BER respecto a frecuencia

Los componentes y los parámetros que utilizaremos para este experimento se describen en la siguiente tabla:

| Elemento             | Nombre                   | Parámetros en el experimento                            |
|----------------------|--------------------------|---|
| Láser                | LD520                    | Longitud de onda: 520nm                                 |
| Fuente de intensidad | LD520P050 de Thorlabs    | Intensidad: 80mA  |
| Fibra lanzadera      | MH                       | Longitud: 1.5m  |
| Fibras 20m           | MH, GH, BH               | Longitud: 20m.<br>NA MH = 0.3, NA GH = 0.5, NA BH = 0.6 |
| Fibra colectora      | BH                       | Longitud: 2m  |
| Atenuador            | NDC-50C-4M-A de Thorlabs | Atenuación: variable                                    |
| Detector             | SPA                      | NA = 0.5  |
| Osciloscopio         | E5071C de Agilent        | Voltaje fijado: 60.12mV                                 |
| Medidor BER          | OPTOBER                  | -   |
| Programa de control  | OPTOBER                  | Modulación: PRBS23<br>Tasa de bit: variable             |

Tabla 5.2. Componentes y parámetros utilizados en la sesión de medida

Se ha tomado como partida el voltaje obtenido con 20 metros de BH (61 mV) que es la fibra con mayor atenuación. Los valores de voltaje iniciales de cada fibra y la atenuación que ha sido necesaria para igualar todas las fibras, incluyendo la fibra de 1 m para obtener la referencia (back-to-back) se muestran en la siguiente tabla. Adicionalmente, con el fin de resaltar la variación de BER con el voltaje recibido, se han tomado, en un día diferente, las mismas medidas sin igualar el voltaje con el atenuador.

| Fibra     | Voltaje con at. a 0dB | Atenuación para llegar a los 60.12mV | Voltaje medidas sesión 2 |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| BH        | 60.12mV               | 0dB                                  | 140.2mV                  |
| GH        | 187.19mV              | 3.7dB                                | 318.97mV                 |
| MH        | 117.1mV               | 0.88dB                               | 450mV                    |
| Colectora | 155.23mV              | 6.956dB                              | 342.9mV                  |

Tabla 5.3. Según el sistema óptico, el voltaje recibido originalmente y la atenuación necesaria para igualarlo a los 60.12mV. Se incluyen también los voltajes correspondientes a la segunda sesión de medida

Los resultados obtenidos a partir de estas condiciones se muestran a continuación. A la izquierda (Fig. 5.8), los resultados obtenidos igualando el voltaje. A la derecha (Fig. 5.9), los resultados obtenidos con el atenuador pero sin introducir atenuación.

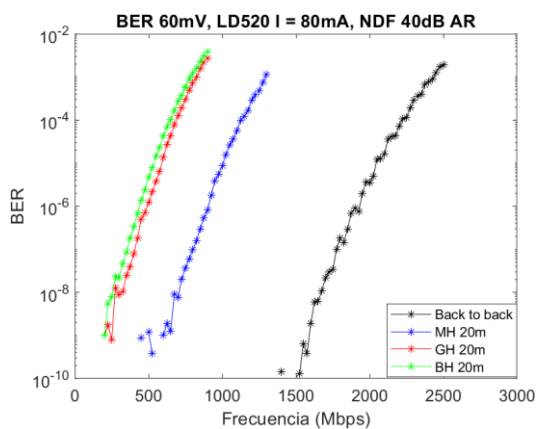


Fig. 5.8. BER en función de la tasa de bit igualando el voltaje en los cuatro sistemas

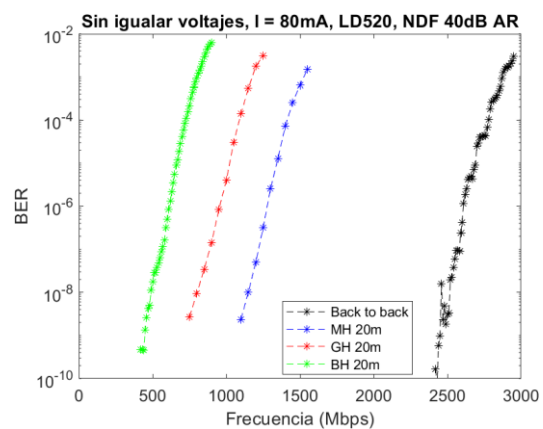


Fig. 5.9. BER en función de la tasa de bit sin igualar el voltaje

Como observamos en los resultados, la fibra que obtiene una curva de BER peor es la BH, muy similar a la de GH. En estos casos, el sistema sólo puede recibir correctamente los datos para tasas menores de 500 Mbps. El sistema con fibra MH alcanza mejores resultados al tener una apertura numérica menor lo que hace que no transmita modos de orden alto que son los que aumentan la dispersión modal, degradando la respuesta frecuencial de la fibra. Por otra parte, su menor apertura reduce la máxima potencia que se puede inyectar en la fibra y, por tanto, la recibida en el receptor. Al compensar este efecto con el atenuador se demuestra su superioridad frente a las otras fibras. En cualquier caso, la comparación de las máximas tasas alcanzables con la MH (1 GHz) y con la fibra colectora (2 GHz), demuestra que, incluso esta fibra MH, presenta una considerable dispersión modal que limita la capacidad del sistema.

Comparando los resultados con los obtenidos con las fibras sin atenuación, vemos el efecto de la potencia recibida. En la medida del back-to-back hay un desplazamiento hacia tasas más altas (de 2 GHz a 2.7 GHz, para BER de  $10^{-6}$ ). También con las tres fibras se observa este mismo efecto. En el caso de la GH la mayor potencia recibida respecto de la BH, mejora notablemente su comportamiento, lo que indica que, en general, la menor atenuación de la fibra GH permite alcanzar tasas mayores que con la BH.

### 5.2.2 Medidas de BER vs potencia recibida

En este experimento, se pretende caracterizar cómo varía el BER en función de la potencia óptica recibida para tasas de bit concretas, con el objetivo de obtener la penalización de potencia (power penalty). La penalización de potencia es un parámetro que indica la potencia adicional que se tiene que inyectar en el sistema para obtener los mismos resultados que en un sistema back to back. Se va a aplicar al mismo láser con ambos detectores, SPD y SPA, y las tres fibras de 20 metros analizadas en el apartado anterior. El sistema experimental y los componentes y parámetros utilizados son los mismos que se muestran en la Fig. 5.7 y en la Tabla 5.2, respectivamente.

En la Fig. 5.10 se presentan sólo los resultados obtenidos para 500 Mbps ya que para esta tasa se han obtenido en todas las posibles combinaciones de fibras y detectores. El resto de las medidas realizadas para varias tasas de transmisión, adaptadas a las características de las fibras y detectores analizados, se encuentran en el *Anexo VI. Medidas de BER vs potencia recibida*

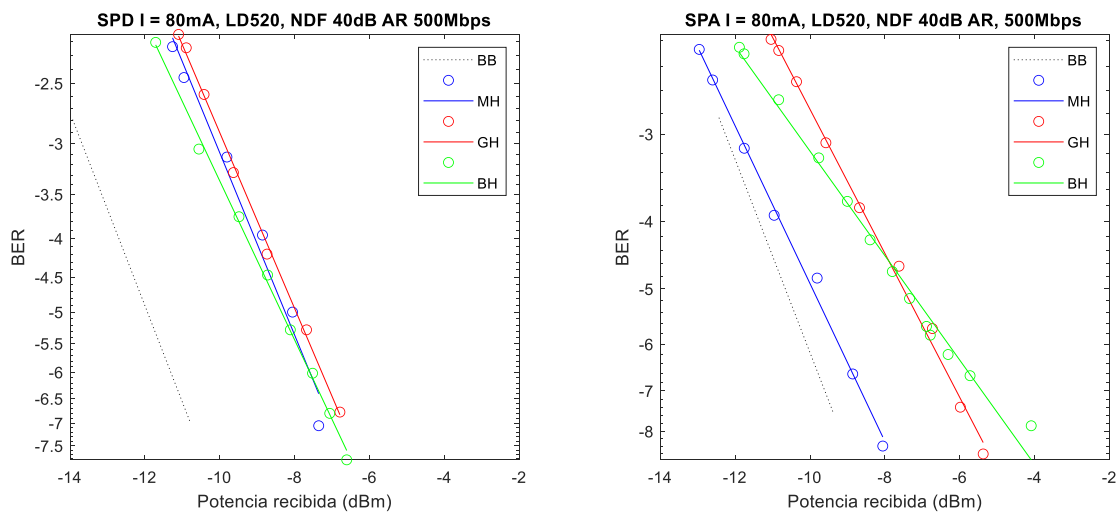


Fig. 5.10. Barridos de potencia para las tres fibras con los dos detectores, en 500Mbps

En la figura, se han representado los valores experimentales obtenidos para el SPD (izquierda) y el SPA (derecha) con símbolos de distinto color para cada tipo de fibra. Las líneas son ajustes a rectas, que se usarán en el cálculo de la penalización en potencia.

La penalización en potencia nos indica cuánto se aleja el sistema óptico estudiado del back to back en términos de BER. Ha sido calculado como la diferencia de potencias entre el back to back y cada una de las rectas, cuando el BER es  $10^{-3}$ , y se representa en la Figura xx para todas las condiciones estudiadas.

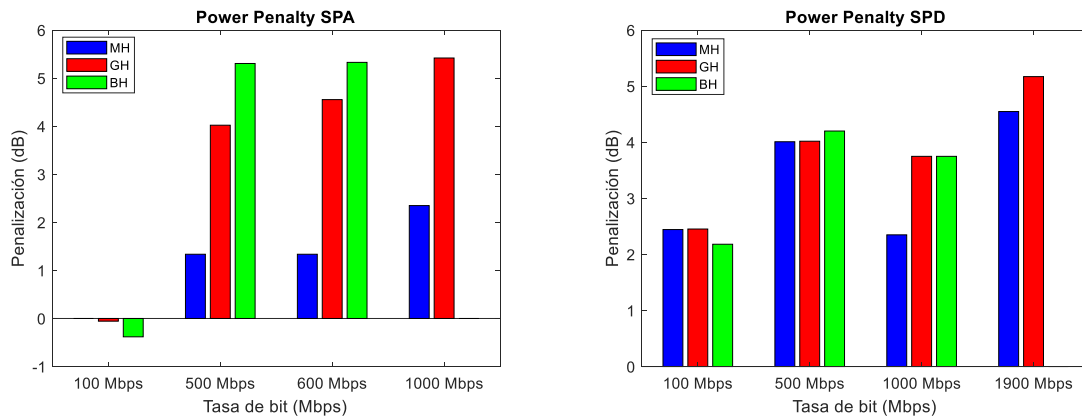


Fig. 5.11. Penalización de potencia para cada sistema, según la tasa de bit y el detector utilizado

Como se observa al comparar la penalización en potencia de los distintos casos, vemos que en caso de utilizar el detector SPA, las diferencias entre tipos de fibras son mayores que con el SPD, excepto en la tasa de 100 Mb/s. Para el SPA, se observa que la fibra con penalización mayor es la BH, mientras que con la MH se obtienen las penalizaciones más bajas coincidiendo con los resultados obtenidos en el apartado anterior. La fibra GH es capaz de alcanzar tasas mayores que la BH si la potencia recibida es suficiente (alta penalización de potencia en 1000 Mbps con el SPA y en 1900 Mbps con el SPD). Por último, se observa una tendencia creciente de la penalización al aumentar la tasa de bit. En el caso del SPD, las penalizaciones correspondientes a distintas fibras están más igualadas. Es notable el caso de la MH que presenta penalizaciones en general mayores para el SPD que para el SPA. Para la BH, sin embargo, son menores con el SPD, posiblemente por el efecto de filtrado. La GH muestra valores similares en ambos casos.



## 6 Conclusiones

### 6.1 Conclusiones

La finalidad de este proyecto ha sido desarrollar un atenuador óptico variable para fibras ópticas de plástico de núcleo con 1mm de diámetro, debido a la ausencia de atenuadores comerciales para POF que introduzcan bajas pérdidas de inserción y escasa alteración de la distribución espacial de intensidad. Además, se ha realizado una aplicación de ordenador que permite controlarlo mediante una interfaz de usuario de fácil manejo y con múltiples opciones.

Una vez fijadas las funciones y especificaciones del producto, se ha partido de un trabajo previo modificando tanto el diseño físico como los programas para cumplir con dichas especificaciones.

El diseño inicial estaba basado en un filtro neutro circular con densidad óptica variable en función del ángulo. El giro del filtro se realizaba mediante un motor bipolar controlado por un Arduino, mediante una interfaz manual que permitía seleccionar el número de pasos del motor.

En este trabajo se han mejorado el diseño físico en los siguientes aspectos:

- Se han evaluado distintos filtros neutros con distintos parámetros, determinando cuales son los que ofrecen un mejor comportamiento.
- Se ha mejorado la carcasa que aloja el filtro, la correa y el motor, incorporando una pieza para fijar una de las fibras y surcos de fijación a una mesa óptica.
- Se han caracterizado distintos acopladores de fusión para usarlos con el atenuador para monitorizar la potencia óptica o la atenuación de forma continua.

En cuanto al control del atenuador, se ha optado por incluir dos interfaces de usuario:

- Una interfaz de usuario física, compuesta por un teclado matricial y una pantalla OLED, que, combinada con una calibración previa, permite utilizar el atenuador sin conexión a un ordenador.
- Una aplicación para Matlab 2020 que ofrece configuraciones más complejas.

El entorno desarrollado para control a través de la interfaz de usuario permite, además de fijar parámetros relativos a la configuración general del atenuador:

- Elegir uno de los dos modos de trabajo: directo con calibración previa y con monitorización de potencia a través de un medidor de potencia controlado desde el programa.
- Realizar calibraciones o cargar curvas de calibración guardadas.
- Seleccionar una potencia óptica, una atenuación o realizar un barrido de un parámetro en función de la potencia o la atenuación.

Por otra parte, se ha realizado una caracterización completa de sus propiedades principales determinando que:

- Sus pérdidas de inserción son iguales o menores que en otras tecnologías de atenuación: como máximo 5 dB cuando incorpora monitorización y 4 dB cuando se usa en modo directo.
- El ensanchamiento de la distribución espacial también es menor que en otras tecnologías y, lo que es más importante, no varía con el valor de la atenuación.
- Cuando se utiliza en el extremo de inyección de un sistema con una fibra de longitud media, los cambios que induce en la respuesta en frecuencia entran dentro de la variabilidad de la misma.

Por último, se han llevado a cabo varias aplicaciones prácticas en las que se ha hecho uso del atenuador. El modo monitorización ha sido elegido para caracterizar dispositivos activos dada la necesidad de una medida precisa y continua de potencia óptica, mientras que, para sistemas con largas longitudes de fibra sensibles a las pérdidas de inserción y a los cambios en la distribución espacial de intensidad, se ha escogido el modo directo.

Las aplicaciones que se han llevado a cabo, y el papel que ha tenido el uso del atenuador en ellas, han sido las siguientes.

- Caracterización de la curva de eficiencia de detectores. Se han caracterizado las curvas de eficiencia (Voltaje/Potencia óptica) de dos detectores para dos longitudes de onda distintas utilizando el modo monitorización.
- Caracterización de fuentes ópticas. Se ha obtenido la respuesta en frecuencia de un sistema formado por un láser de alta emisión y un receptor y su BER en función de la tasa de transmisión para distintas intensidades de corriente de operación.
- Comparación de BER vs tasa de transmisión para tres fibras de características diferentes igualando la potencia recibida.
- Medidas de BER vs potencia recibida, para distintas fibras. con distintos detectores y varias tasas de transmisión, para obtener la penalización de potencia en cada condición sin modificar las condiciones de inyección.

En resumen, se ha desarrollado un dispositivo flexible, portátil y portable. Flexible en cuanto a que se pueden cambiar sus elementos (filtro, acoplador, etc.) y el modo de trabajo. Portátil, ya que es ligero y compacto de forma que se puede trasladar fácilmente para incorporarlo a distintos sistemas experimentales. Portable porque los programas de control desarrollados se pueden instalar en un ordenador de prestaciones medias. Además, el diseño se basa en componentes de uso general en laboratorios de óptica (filtros, posicionadores, etc.) que se pueden adquirir a un coste razonable. Sus pérdidas de inserción son iguales o menores que en otras tecnologías y el ensanchamiento que produce en la distribución espacial de intensidad es leve y, lo que es crucial, igual para todo el rango de atenuación. Además, el atenuador se ha utilizado en la realización de diferentes experimentos, demostrando su versatilidad y su facilidad de integración.

## 6.2 Líneas futuras

Al concluir este proyecto, el laboratorio de POF dispone de un atenuador variable, específico para POF con control por ordenador mediante una interfaz de usuario sencilla. Este atenuador se está ya utilizando para realizar experimentos de caracterización de fibra para los cuales es imprescindible.

El control del atenuador está abierto a mejoras. Actualmente, para cambiar entre la interfaz física y la interfaz de Matlab hay que cargar de nuevo el código a la placa de Arduino, cambiando el valor de una variable según la interfaz deseada. Este proceso podría automatizarse mediante un interruptor que activara un modo u otro según su posición. Por otro lado, para contar con un diseño más compacto del circuito de control, existe la posibilidad de diseñar y montar una PCB.

Adaptando la interfaz a las de otros equipos de medida, se podrían automatizar los procesos de barrido que ahora mismo, requieren la intervención del usuario para introducir el parámetro medido.

Además, el diseño físico también podría mejorar para reducir las pérdidas de inserción mediante "taperización" (estrechamiento) de la fibra lanzadera, lentes de focalización, etc.

En este trabajo solamente se han incluido algunas aplicaciones, pero el atenuador tiene un diseño flexible que permite su uso en otros puntos del sistema (por ejemplo, cerca del receptor). El atenuador desarrollado tiene un gran potencial para cualquier tipo de aplicación que requiera introducir una atenuación de forma controlada y precisa.

Aunque este atenuador se ha diseñado específicamente teniendo en cuenta las propiedades de las POFs de 1 mm de diámetro, pero puede ser utilizado para la caracterización de otros tipos de fibra sin apenas modificaciones

## 7 Bibliografía

- [1] [En línea]. Available: <https://www.homefibre.at/en>.
- [2] A. Grzempa, MOST : the automotive multimedia network, Francis Verlag, 2011.
- [3] [En línea]. Available: <https://www.kdpof.com/home-soho/#home-wi-fi>.
- [4] T. Truong, «Commercial airplane fibre optics: Needs, opportunities, challenges,» de *Conference on Plastic Optical Fibers and Application*, Tokyo, Japan, 2010.
- [5] A. Lopez, N. Villar, A. Losada, E. Laporta y J. Mateo, «Experimental characterization of the transmission properties of large-core graded-index PMMA fibers,» de *22th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bari, Italy, 2020.
- [6] A. López y a. et, «Experimental Characterization of Transmission Properties in Multi-Core Plastic Optical Fibers,» de *18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Trento, Italy, 2016.
- [7] J. A. Altabas, D. Izquierdo, A. López, M. A. Losada, J. Clemente, S. Sarmiento, J. Mateo, J. A. Lazaro y I. Garces, «Experimental demonstration of multiband CAP modulation for SI-POF links,» de *27th International Conference on Plastic Optical Fibers and Application*, Seattle (US), 2018.
- [8] [En línea]. Available: <https://www.ozoptics.com/products/attenuators.html>.
- [9] [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=11173](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11173).
- [10] S. Porroche, M. A. Losada, A. López, J. Mateo, X. Jiang, D. Richards y N. Antoniadis, «Experimental Characterization of a Custom-Made Blocking-Style POF Attenuator.,» de *27th International Conference on Plastic Optical Fibers and Application*, Seattle (US), 2018.
- [11] P. Castillo, «Integración de tecnologías y sistemas de telecomunicación. Proyecto».
- [12] A. Lopez, M. Losada y J. Mateo, «Polymer Optical Fibers, POF,» de *Optical And Microwave Telecommunications Networks*, John Wiley & Sons, 2016, pp. 306-327.
- [13] P. Heredia, «Estudio de la capacidad de transmisión de las fibras ópticas de plástico de gran núcleo en aplicaciones en el hogar,» Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Proyecto Fin de Carrera, Zaragoza, 2008.
- [14] O. Ziemann, J. Krauser, P. Zamzow y W. Daum, «Application of Polymer Optical and Glass Fibers,» de *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, 2008.

- [15] Thorlabs, «Variable ND Filters. Thorlabs,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1393](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1393). [Último acceso: 17 05 2021].
- [16] M. Kagami, A. Kawasaki, M. Yonemura, M. Nakai, P. V. Mena y D. R. Selviah, «Encircled Angular Flux Representation of the Modal Power Distribution and Its Behavior in a Step Index Multimode Fiber,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, nº 3, pp. 943-95, 2016.
- [17] A. Lopez, A. Losada, J. Mateo y J. Zubia, «On the Variability of Launching and Detection in POF Transmission Systems,» de *20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2018.
- [18] M. A. Losada, J. Mateo y J. J. Martínez, «Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model,» *IOP Journal of Optics*, 2011.
- [19] D. Richards, M. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang y N. Madamopoulos, «Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System,» *J. Light. Technol.*, vol. 31, pp. 468-475, 2013.
- [20] M. A. Losada, A. López y J. Mateo, «Attenuation and Diffusion Produced by Small-Radius Curvatures in POFs.,» *Optics Express*, vol. 24, nº 14, pp. 15710-15720, 2016.
- [21] J. Mateo, M. A. Losada y J. Zubia, «Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation,» *Optic Express*, vol. 17, nº 4, pp. 2850-2860, 2019.
- [22] N. Villar, «Análisis de la influencia de la inyección en las propiedades de transmisión de fibras de plástico de gradiente de índice (GI-POF),» Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Trabajo Fin de Grado, Zaragoza, 2020.
- [23] E. L. Puyal, «Caracterización experimental de las propiedades de transmisión en fibras ópticas de plástico de índice gradual (GI-POF),» Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, Zaragoza, 2016.
- [24] Thorlabs, «Power and Energy Meter Interface for Photodiode, Thermal, and Pyroelectric Sensors. Thorlabs,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4037&pn=PM100USB#13209](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4037&pn=PM100USB#13209). [Último acceso: 17 05 2021].
- [25] Thorlabs, «Legacy Software for Touchscreen, Handheld and USB-Interface Power Meters,» [En línea]. Available: [thorlabs.com/software\\_pages/ViewSoftwarePage.cfm?Code=PM100x](https://www.thorlabs.com/software_pages/ViewSoftwarePage.cfm?Code=PM100x). [Último acceso: 1 6 2021].
- [26] Graviton Incorporated, «O/E Converter : SPD-2\_650nm and SPD-1\_850nm,» [En línea]. Available:

- [https://www.graviton.co.jp/graviton\\_WEB/OE/Subpages/HP\\_OE\\_SPD-2\\_Eng.html](https://www.graviton.co.jp/graviton_WEB/OE/Subpages/HP_OE_SPD-2_Eng.html).  
[Último acceso: 05 06 2021].
- [27] Graviton Incorporated, «O/E Converter : SPA-2\_650nm,» [En línea]. Available: [https://www.graviton.co.jp/graviton\\_WEB/OE/Subpages/HP\\_OE\\_SPA-2\\_Eng.html](https://www.graviton.co.jp/graviton_WEB/OE/Subpages/HP_OE_SPA-2_Eng.html).  
[Último acceso: 05 06 2021].
- [28] D. E. Navarro, «Desarrollo de un sistema automático de captación y análisis de imágenes de la distribución de campo lejano de fibras ópticas,» Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Proyecto Fin de Carrera, Zaragoza, 2004.
- [29] S. Ramón, «Medida de la respuesta frecuencial en fibras ópticas de plástico de múltiples núcleos mediante un analizador de redes vectorial,» Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza: Trabajo Fin de Grado, 2015, Zaragoza, 2015.
- [30] S. Porroche, M. A. Losada, A. López, J. Mateo, X. Jiang, D. Richards y N. Antoniades, «EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF A CUSTOM-MADE BLOCKING-STYLE POF ATTENUATOR,» de *International Conference on Plastic Optical Fibers*, Seattle, 2018.
- [31] A. López, M. A. Losada, J. Mateo, X. Jiang, D. Richards y N. Antoniades, «Characterization of a Y-coupler and Its Impact on the Performance of Plastic Optical Fiber Links,» *Fibers*, vol. 6(4), nº 96, 2018.
- [32] M. A. Losada, J. Mateo, J. J. Martínez-Muro y A. López, «SI-POFs frequency response obtained by solving the power flow equation,» de *17th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Santa Clara (US), 2008.
- [33] M. Losada, J. Mateo y A. López, «Matrix model of optical power propagation in Plastic Optical Fibres,» de *12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Munich, Germany, 2010.
- [34] A. López, M. Losada y J. Mateo, «Simulation framework for POF-based communication systems,» de *17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2015.
- [35] D. Richards, A. Lopez, M. A. Losada, P. V. Mena, E. Ghillino, J. Mateo, N. Antoniades y X. Jiang, «Overcoming Challenges in Large-Core SI-POF-based System-Level Modeling and Simulation,» *Photonics*, vol. 6, nº 88, 2019.
- [36] C. Muzás, M. Á. Losada, M. Mazo, J. Mateo y A. López, «Atenuador para fibras ópticas de plástico de gran núcleo basado en un filtro circular de densidad óptica variable,» de *XII Reunión Nacional de Optoelectrónica (OPTOEL)*, Zaragoza, 2021.

## Anexo I. Circuito de control del motor

El circuito de control del motor fue diseñado por Pilar Castillo, como parte de su proyecto final en la asignatura “Integración de tecnologías y sistemas de telecomunicación”, aunque durante este trabajo, se han incluido algunas mejoras en el funcionamiento. En este anexo, se detalla el funcionamiento del circuito original que controla el motor, así como la interfaz física de usuario, y las mejoras que se han incluido en este trabajo.

### Interfaz de usuario

#### Teclado matricial 5x4

El primer elemento que encontramos en el sistema es el teclado matricial. Este elemento es la pieza fundamental de la interfaz de usuario física, ya que, junto con el programa de ordenador, es el componente que permite al usuario controlar el sistema.

El teclado se compone por 16 teclas: 10 teclas numéricas correspondientes con los números del 0 al 9, y 10 teclas adicionales, que contienen teclas y símbolos. Están dispuestas en una matriz 5x4, como se muestra en la Fig. 1.

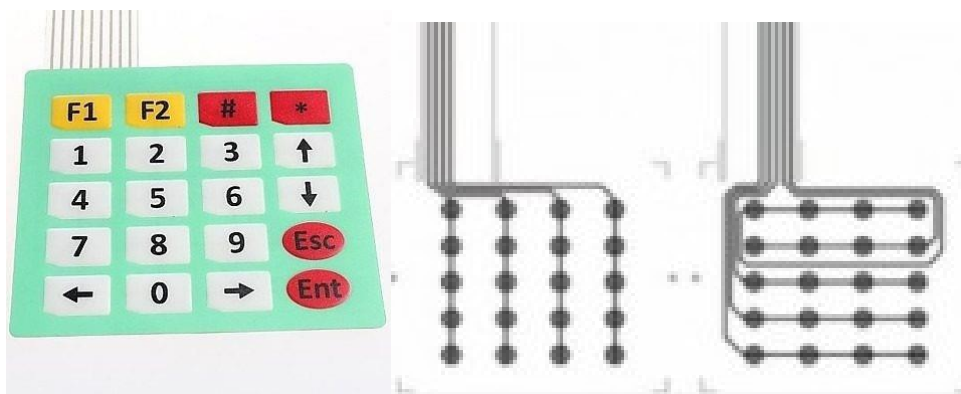


Fig. 1. Configuración de un teclado matricial 5x4

Observando el circuito electrónico correspondiente al teclado comprobamos que equivale a una malla de pulsadores compuesta por cinco filas y cuatro columnas. Cada fila cuenta con 4 pulsadores conectados en serie, mientras que cada columna incluye 5 pulsadores conectados en paralelo.

De esta forma, tenemos un total de 9 salidas, correspondientes a cada fila y a cada columna. Interpretando estas salidas como un código digital, podemos determinar de manera inequívoca qué tecla se ha pulsado.

Por ejemplo, si se pulsa la tecla 6, posicionada en la matriz en la fila 3 y la columna 3, la salida digital del teclado será 01011 1101. Cuando se deje de pulsar, la salida digital pasará a ser 11111 1111.

Como se expresa en el capítulo Modificaciones sobre el control del motor, en este trabajo se ha utilizado un teclado matricial 4x4 en lugar de un 5x4, con las funcionalidades que se exponen en el texto.

#### Expansor 8 bits para bus I2C

En el trabajo original, las 9 salidas del teclado matricial eran conectadas a 9 pines digitales del Arduino UNO. Sin embargo, en este trabajo, estas entradas digitales quedan reservadas para el

motor paso a paso bipolar que controla el giro del filtro neutro. Es por eso por lo que necesitaremos un expansor 8 bits que serialice las 8 salidas digitales del teclado matricial (Fig. II). En nuestro caso, utilizaremos el Expansor de 8 bits para bus I2C PCF8574AN de Texas Instruments. Esta decisión viene condicionada por el hecho de que otros periféricos, como la pantalla OLED, también hacen uso del protocolo I2C.

El protocolo I2C es un protocolo de comunicación serie síncrona que se basa en la transmisión de dos señales: una señal de reloj, SCL, que permite el sincronismo entre los elementos interconectados, y una señal de datos, SDA, en la que los distintos elementos depositan sus datos.

Gracias a este protocolo podremos conectar simultáneamente distintos elementos, como en nuestro caso, el teclado, la pantalla y la placa de Arduino.

El protocolo I2C sigue una estructura maestro-esclavo. El maestro, en nuestro caso la placa de Arduino, genera la señal de reloj y contacta con los distintos periféricos, en este caso la pantalla y el teclado, cada vez que requiera realizar una acción de lectura o de escritura. La distinción entre esclavos se logra asignando una dirección de memoria diferente a cada uno de los periféricos.

Los dispositivos esclavos quedan a la espera de que el dispositivo maestro solicite, mediante la señal de datos, una operación de lectura/escritura. Esta se compondrá por una condición de comienzo, la dirección de memoria del periférico a encuestar y un bit que indica si la operación será de lectura o escritura. Una vez el periférico acepte esta petición, se realizará la lectura o escritura del periférico.

| DW OR N PACKAGE<br>(TOP VIEW)       | PIN                     |                                |                                |                           | TYPE | DESCRIPTION   |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|------|---|
|                                     | NAME                    | RGY                            | DGV or PW                      | DW or N                   |      |   |
| A0 [ 1 16 ] V <sub>CC</sub>         | A[0..2]                 | 6, 7, 9                        | 6, 7, 9                        | 1, 2, 3                   | I    | Address inputs 0 through 2. Connect directly to V <sub>CC</sub> or ground. Pullup resistors are not needed. |
| A1 [ 2 15 ] SDA                     | GND                     | 15                             | 15                             | 8                         | —    | Ground  |
| A2 [ 3 14 ] SCL                     | $\overline{\text{INT}}$ | 1                              | 1                              | 13                        | O    | Interrupt output. Connect to V <sub>CC</sub> through a pullup resistor.                                     |
| P0 [ 4 13 ] $\overline{\text{INT}}$ | NC                      | 3, 8, 13, 18                   | 3, 8, 13, 18                   | -                         | —    | Do not connect  |
| P1 [ 5 12 ] P7                      | P[0..7]                 | 10, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 20 | 10, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 20 | 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 | I/O  | P-port input/output. Push-pull design structure.  |
| P2 [ 6 11 ] P6                      | SCL                     | 2                              | 2                              | 14                        | I    | Serial clock line. Connect to V <sub>CC</sub> through a pullup resistor                                     |
| P3 [ 7 10 ] P5                      | SDA                     | 4                              | 4                              | 15                        | I/O  | Serial data line. Connect to V <sub>CC</sub> through a pullup resistor.                                     |
| GND [ 8 9 ] P4                      | V <sub>CC</sub>         | 5                              | 5                              | 16                        | —    | Voltage supply  |

Fig. II. Pinout del expansor I2C

Volviendo al PCF8574AN, vemos que este circuito integrado cuenta con 8 puertos (P[0...7]) que actuarán como entradas digitales a serializar. Conectaremos a estos 8 puertos las salidas digitales del teclado matricial. Por otro lado, a partir de las entradas A[0...2] se puede seleccionar la dirección de memoria de este elemento. En nuestro caso, conectaremos estas tres entradas a tierra, asignando la dirección de memoria 0x0020. Por último, vemos la entrada SCL, que será la entrada de la señal de reloj generada por la placa de Arduino y el puerto SDA, que actuará como entrada/salida de la señal de datos.

### Pantalla OLED

Esta pequeña pantalla OLED de 128x32 pixeles (Fig. III) servirá para mostrar al usuario la atenuación que está siendo introducida por el sistema. Cuenta con 4 pines: el primero para la alimentación, el segundo para tierra, y los dos pines propios del protocolo I2C: una entrada para



la señal de reloj y un puerto para la entrada/salida de datos. Por ello, al igual que el teclado, esta pantalla también será controlada por la placa de Arduino mediante el bus I2C. Esta configuración se ha mantenido igual para este proyecto que para el proyecto anterior.



Fig. III. Pantalla OLED con conexión I2C

### Circuito de control

#### Motor paso a paso bipolar

El motor paso a paso bipolar es el accionador fundamental para el funcionamiento del atenuador óptico variable. Este motor es activado según las órdenes introducidas por la placa Arduino y permite girar el filtro neutro los grados que sea necesario.

En el trabajo anterior, el motor escogido presentaba una precisión de 200 pasos por giro completo, es decir, cada paso del motor era equivalente a un giro de  $1.8^\circ$ . En nuestro caso, se ha escogido un motor de mayor precisión, 2048 pasos por giro completo, equivalente a un giro de  $0.17^\circ$  por paso. Esta precisión es suficiente, ya que, el propio diámetro de las POFs y la dimensión del filtro neutro nos limitan todavía más.

Como vemos en la Fig. IV, cuenta con 5 pines, uno de ellos para alimentación de 5V, y los otros cuatro para controlar el movimiento del motor. El motor se activa cuando se reciben pulsos eléctricos alternativamente a través de los cuatro pines. Debido al alto consumo de este motor, es necesario utilizar una pequeña etapa de potencia que aporte la potencia necesaria para su funcionamiento.

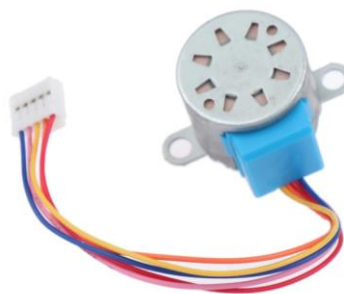
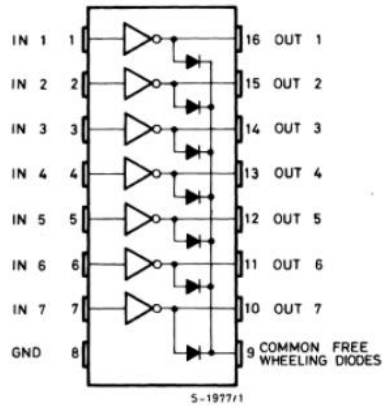


Fig. IV. Motor bipolar

#### Etapa de potencia ULN2001

Este driver (Fig. V) únicamente amplifica la señal emitida por los pines digitales del Arduino y la adapta a la potencia que necesita el motor bipolar para funcionar. Así, conectaremos los pines IN1, IN2, IN3, IN4 a los pines D8, D9, D10 y D11 de la placa Arduino y los pines OUT1, OUT2, OUT3 y OUT4 a cada uno de los pines del motor bipolar. También añadiremos unos LEDs a la

entrada de este driver para comprobar que la señal se está emitiendo correctamente desde la placa.



*Fig. V. Esquema de funcionamiento de la etapa de potencia*

### Librerías

En la Tabla I, se muestran las librerías utilizadas en este proyecto. Se indica con \* las librerías que no se encontraban en el proyecto original.

| Librería           | Descripción  | Funciones utilizadas en el código   |
|--------------------|--|---|
| Stepper.h          | Se utiliza para controlar motores bipolares.                             | motor.setSpeed(int speed)<br>motor.step(int npasos)   |
| Keypad.h           | Sirve para controlar teclados matriciales.                               | makeKeymap(byte teclas)   |
| Keypad_I2C.h *     | Librería basada en Keypad.h para controlar teclados matriciales con I2C. | Keypad_I2C(byte keymap, byte PinsFilas, byte PinsColumnas, byte FILAS, byte COLUMNAS, int ADDRESS)<br><br>kpd.begin()<br><br>kpd.getKey() |
| Wire.h *           | Permite la comunicación serie con el PC                                  | Serial.begin( int tasaTransmision)<br><br>Serial.available()<br><br>Serial.println()  |
| Adafruit_SH1106.h  | Se utilizan para controlar la pantalla OLED.                             | display(-1)   |
| Adafruit_GFX.h     |  | display.setTextColor(int letra, int fondo)  |
| Adafruit_SSD1306.h |  | display.begin(int _ , int OLED_ADDR)  |
|                    |  | display.clearDisplay()<br>display.display()<br>display.setCursor(int x, int y)<br>display.println(String text)                            |

*Tabla 1. Librerías utilizadas en el proyecto de Arduino*

## Funcionalidades

El proyecto original ofrecía un menú con cuatro opciones:

- Mover x grados. El NDF gira los grados indicados
- Mover hasta x grados. Se realiza el cálculo para llegar hasta la posición indicada y se mueve el NDF.
- Cambiar velocidad (rpm). Modifica la velocidad de giro del motor.
- Poner a 0. Guarda la posición actual como grado 0.

En este trabajo, en lugar de trabajar en grados, se trabaja con atenuaciones, calculadas a partir de las curvas de atenuación teóricas dadas por el fabricante. Sin embargo, de momento solo

está programado con las curvas de atenuación teóricas para modelos de NDF que llegan hasta los 20 dB de atenuación.

## Anexo II. Caracterización de acopladores

Los acopladores IFO son acopladores específicos para POF que se fabrican uniendo dos tramos cortos de fibras por fusión. En la zona de contacto, la potencia se transfiere en distinta proporción de una fibra a otra de forma que, según la entrada, se distribuye de distinta forma en cada una de las salidas. La fibra utilizada para fabricar los acopladores que hemos adquirido y que tenemos disponibles en el laboratorio ha sido la GH4001. Aunque en dichas hojas de características aparece una proporción nominal de acoplo entre salidas (90/10, 80/20, 50/50) este valor es sólo indicativo y es necesario caracterizar cada ítem ya que sus valores varían bastante de uno a otro. Por ello, se realizaron caracterizaciones completas de aquellos modelos más adecuados para su uso con el atenuador, el IF541 (80/20) y el IF542 (90/10). Para ello, en primer lugar, se tomaron las pérdidas de inserción de cada uno de los acopladores, calculadas como la diferencia entre la potencia entre la potencia inyectada y la potencia en cada uno de los puertos de salida (Tabla II).

| PÉRDIDAS DE INSERCIÓN IF542 650nm (dB) |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|
| SALIDA                                 | 1     | 2     | 3     | 4     |
| ENTRADA                                |       |       |       |       |
| 1                                      |       | 25,92 | 0,78  | 16,7  |
| 2                                      | 24,7  |       | 14,04 | 2,02  |
| 3                                      | 2,67  | 17,84 |       | 28,23 |
| 4                                      | 16,64 | 2,19  | 26,6  |       |

Tabla II. Pérdidas de inserción del acoplador IF542 medidas en 650nm (dB)

Un ejemplo es un ítem del modelo IF542 cuya matriz completa de caracterización para longitud de onda 650 nm se presenta a continuación (Tabla III). Con esta matriz se pueden obtener todos los parámetros relevantes, incluyendo pérdidas de inserción para 2 puertos cualesquiera y relación o tasa de acoplo entre dos puertos de salida para cualquiera de las entradas. La tasa de acoplo es el parámetro más relevante para su aplicación con el atenuador en modo de monitorización ya que permite obtener la potencia recibida en uno de los puertos en función del valor obtenido en el contiguo con el medidor de potencia óptica.

| POTENCIA MEDIDA 650nm (dBm) |        |        |        |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| SALIDA                      | 1      | 2      | 3      | 4      |
| ENTRADA                     |        |        |        |        |
| 1                           |        | -21,98 | 3,16   | -12,76 |
| 2                           | -20,76 |        | -10,1  | 1,92   |
| 3                           | 1,27   | -13,9  |        | -24,29 |
| 4                           | -12,7  | 1,75   | -22,66 |        |

Tabla III. Potencia medida en los puertos del acoplador IF542 según el puerto de inyección, para 650nm (dB)

A continuación, se muestran las tasas de acoplo de dos acopladores distintos: un IF541 y otro ítem distinto del IF542

| IF541 650nm (%) |      |    |      |      |
|-----------------|------|----|------|------|
| out/in          | 1    | 2  | 3    | 4    |
| 1               |      |    | 77,1 | 22,5 |
| 2               |      |    | 22,9 | 77,5 |
| 3               | 73,2 | 22 |      |      |
| 4               | 26,8 | 78 |      |      |

Tabla IV. Tasas de acoplo del IF541 medidas en 650nm (%)

| IF542' 650nm (%) |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| out/in           | 1     | 2     | 3     | 4     |
| 1                |       |       | 97,51 | 2,49  |
| 2                |       |       | 5,91  | 94,09 |
| 3                | 97,05 | 2,95  |       |       |
| 4                | 3,46  | 96,54 |       |       |

Tabla V. Tasas de acoplo de IF542' medidas en 650nm (%)

Como vemos, las mayores tasas de acoplo para los dos acopladores se dan entre los puertos 1 y 3, y 2 y 4. Además, existe aislamiento entre las entradas (entre 1 y 2; y 3 y 4). En el diseño del sistema del atenuador, este será el recorrido que realizará la señal útil, por lo que, para elegir la pareja de puertos más adecuada, se hizo un estudio preliminar de la proporción de potencia en función del ángulo (EAFs) obtenida inyectando por uno de estos puertos y con salida por el otro. La obtención de la EAF a partir de las imágenes de campo lejano se describen brevemente en el capítulo *Caracterización* y en el *Anexo IV. Sistemas Experimentales*. En la Fig. VI; se muestran las EAFs para 2 combinaciones de puertos de dos acopladores. Las medidas se hicieron inyectando con el láser LD520. Como referencia se ha incluido la medida con una fibra MH de 1 metro.

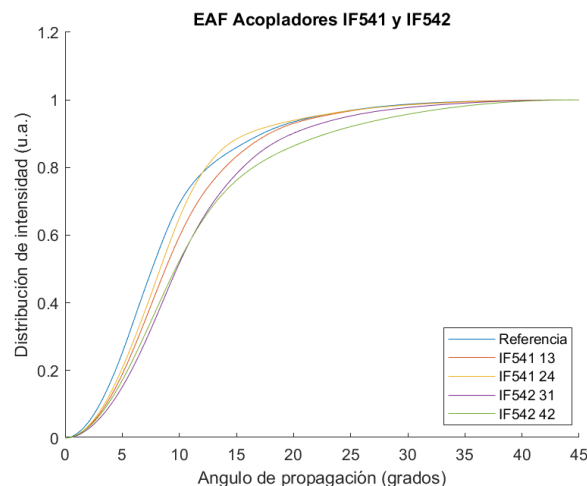


Fig. VI. Comparación de la EAF de los distintos acopladores sin el atenuador en el sistema

Los resultados muestran que hay un cierto ensanchamiento de la distribución espacial en la mayoría de las combinaciones, que no excede en ningún caso los 5°. Estos resultados nos permiten seleccionar los puertos 2-4 para el IF541 y el 3-1 para el IF542 que es donde se aprecian menores cambios de la EAF respecto a la referencia.

Esta caracterización realizada para varios de los acopladores disponibles, debería realizarse con cada nuevo acoplador ya que, como se ha dicho, su proceso de fabricación da lugar a una gran variabilidad en su comportamiento.

## Anexo III. Manual y guía de instalación

Una de las características fundamentales del atenuador es su portabilidad, tanto en el sentido físico de peso y espacio, como en el sentido software. Por ello, en este anexo se detallan los archivos necesarios y su orden de instalación.

### Instalación

En primer lugar, es importante destacar el tipo de aplicación que se ha desarrollado. La aplicación desarrollada es una aplicación de Matlab 2020a, es decir, se ejecuta desde Matlab. Por ello, para poder ejecutarla, es necesario contar con esta versión de Matlab.

El paquete de instalación contiene los elementos que se muestran en la figura. Se ha creado un archivo .bat que ejecuta el proceso de instalación de forma automática, pero en caso de no contar con él, las instrucciones de instalación son las siguientes.

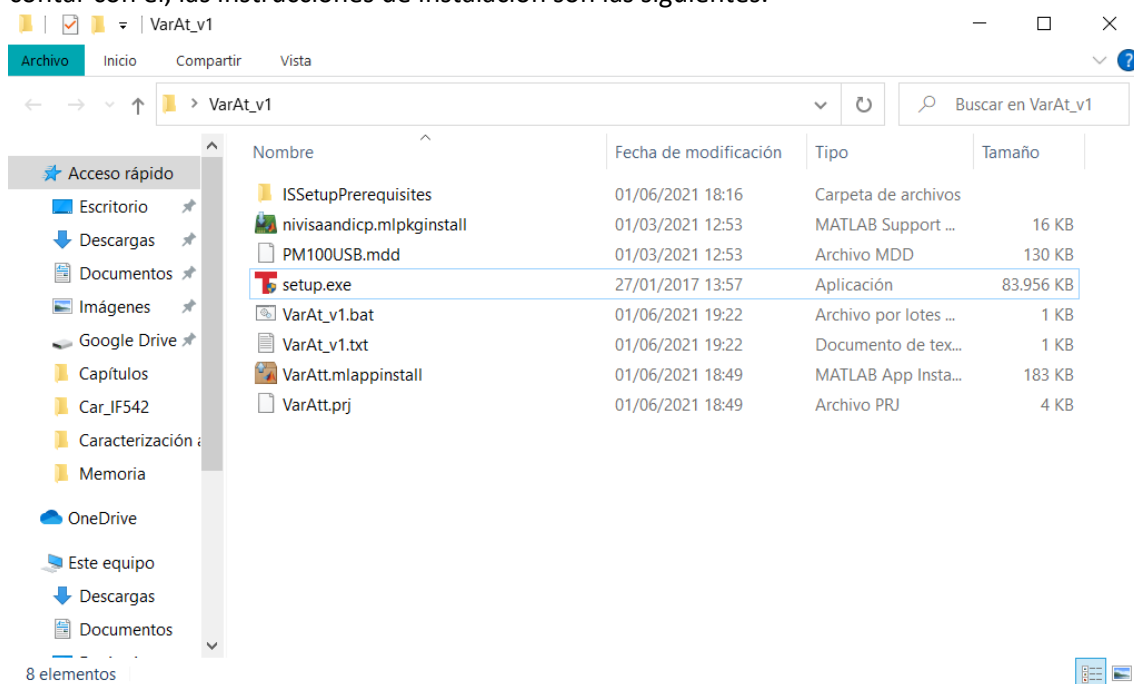


Fig. VII. Elementos del paquete de instalación

1. Ejecutar setup.exe. Este programa controla el driver PM100D, necesario para el medidor de potencia.
2. Aceptar la instalación de LabView. setup.exe requiere la instalación de LabView 2015 para su funcionamiento. Por ello, es necesario aceptar esta instalación y reiniciar el ordenador al terminar, como el programa solicita. El paquete de instalación cuenta con todos los archivos necesarios para llevarla a cabo.
3. Lanzar de nuevo setup.exe y finalizar su configuración.
4. Tras la instalación del driver, debería haberse creado el programa Thorlabs.PMDrivrSwitcher.exe en la ruta C:\Program Files (x86)\Thorlabs\PowerMeters\Tools\DriverSwitcher. Conectar el medidor de potencia al ordenador y lanzar el programa como administrador. Comprobar que se puede cambiar al driver PM100D.
5. En la carpeta de la figura, se encuentra el archivo PM100USB.mdd. Este archivo es el driver de Matlab que permite utilizar las funciones del medidor desde su entorno. Copiar este archivo en la ruta C:\Program Files\Matlab\R2020a\toolbox\instrument\instrument\drivers

- Por último, lanzar VarAtt.mlappinstall. Con ello, se instalaría finalmente la app en Matlab, como se muestra en la siguiente figura.

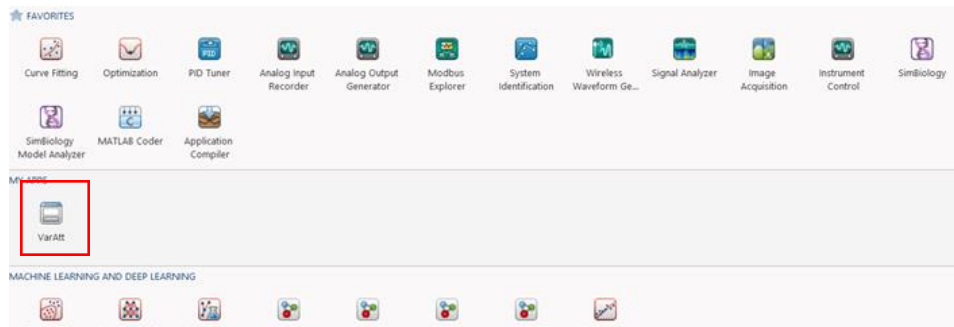


Fig. VIII. Localización de la aplicación VarAtt entre el resto de Apps de Matlab

## Manual

La interfaz gráfica del atenuador presenta un diseño intuitivo de fácil manejo (Fig. IX). Cuenta con cuatro tipos de funciones.

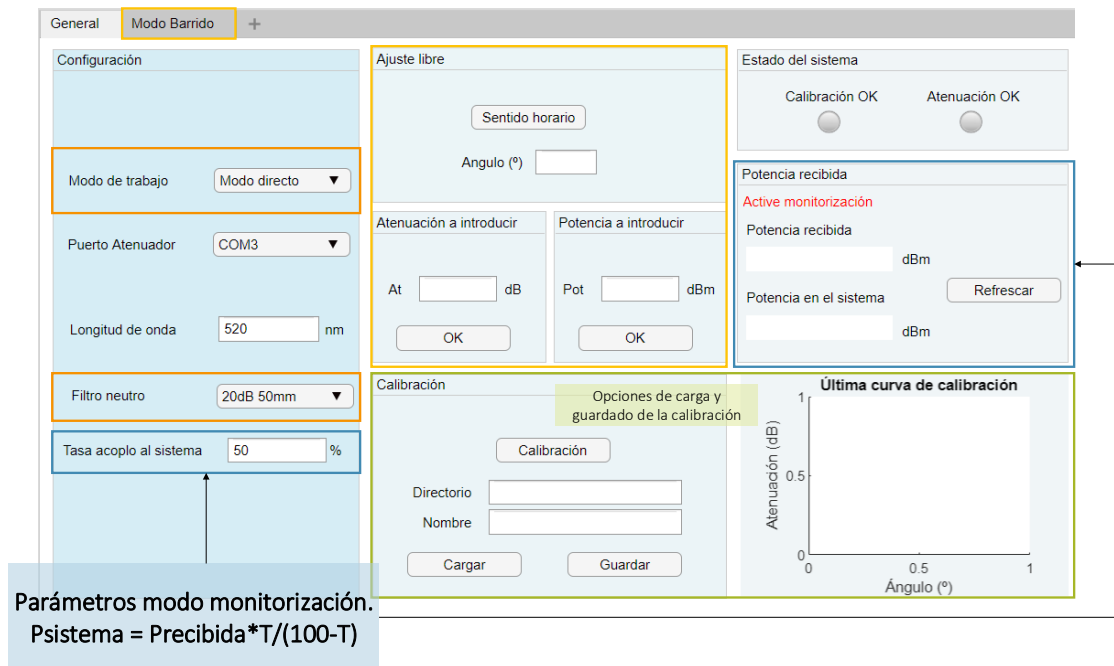


Fig. IX. Interfaz gráfica de la aplicación, dividida por bloques

En primer lugar, encontramos las funciones de configuración. Estas opciones son introducidas por el usuario con el fin de que las atenuaciones introducidas en el sistema sean lo más precisas posible. Entre ellas se encuentran la selección de la longitud de onda, la selección del filtro neutro, o la selección del puerto COM en el que se encuentra el Arduino. Otra opción dentro de la configuración es el modo de trabajo. El atenuador permite trabajar en dos modos de trabajo: un modo monitorización, en el que, a partir de un divisor y un medidor de potencia, se puede controlar constantemente la potencia inyectada al sistema óptico, y un modo directo, en el que se prescinde de estos dispositivos y se parte de una pre-calibración para realizar las atenuaciones.



El segundo tipo de funciones son las relacionadas con el modo de atenuación. Existen cuatro modos de atenuación:

- Ajuste libre. El giro del NDF se basa en el número de grados introducido en lugar de en un valor de potencia o atenuación. Este método es perfecto para medidas rápidas y poco precisas, ya que no requiere de ningún tipo de calibración
- Atenuación a introducir. Se introduce la atenuación que se quiera introducir sobre el sistema y, a partir de las curvas de calibración (puede ser una pre-calibración o una calibración instantánea, dependiendo del modo de trabajo), se gira el motor el número de pasos necesarios para obtenerla.
- Potencia a introducir. Muy similar al modo anterior, solo que, en lugar de introducir una atenuación, se introduce la potencia deseada a la entrada del sistema óptico.
- Modo barrido (se encuentra en la segunda pestaña). Realiza varias medidas de atenuación consecutivas según una atenuación inicial y una atenuación final introducidas, y el paso establecido entre medidas. Este método está pensado para realizar barridos de potencia y compararlos con otras medidas, por ejemplo, medidas de BER. Por ello, es posible introducir este valor en el programa, y se realizaría una gráfica en tiempo real de ese valor vs la potencia inyectada al sistema. También se ofrece la posibilidad de guardar el vector que recoge esta relación una vez terminado el barrido.

El tercer bloque de funciones son las funciones calibración. Es fundamental contar con curvas de calibración actualizadas para tener un funcionamiento preciso del atenuador. Sin embargo, si no es posible tomarlas, existe la opción de cargar curvas de calibración que hayan sido guardadas en sesiones anteriores. También, si se detecta que el medidor de potencia está conectado, es posible tomar una curva de calibración de forma manual. La curva de calibración más reciente se representa en la gráfica.

Por último, el bloque de funciones relacionadas con la monitorización muestra funciones muy diversas, aunque solo son significativas cuando el modo monitorización está activador. En primer lugar, es necesario definir la tasa de acoplo de la salida del acoplador que se inyecta al sistema. De esta forma, es posible calcular automáticamente la potencia inyectada al sistema conociendo la potencia en la otra salida del acoplador. Las funciones Potencia recibida y Potencia en el sistema indican las potencias actuales que hay en cada una de las salidas del acoplador. Generalmente, no se actualizan constantemente, sino que hay que pulsar en el botón "Refrescar" para obtener nuevos valores de ambas.

Finalmente, la interfaz cuenta con una serie de mensajes de error, que se activan cuando no es posible llevar a cabo una de las funciones. Por ejemplo, si se intenta poner el sistema en modo monitorización pero no se detecta el medidor de potencia, aparecerá un aviso indicando que se conecte el medidor de potencia, y no se llegará a ejecutar la función.

## Anexo IV. Sistemas Experimentales

En este anexo, se definen los montajes experimentales utilizados para la toma de distintas medidas, como el ensanchamiento de la distribución espacial de potencia, la medida de la respuesta en frecuencia de un sistema o las medidas de BER. Además de explicar los montajes físicos también se detallará el manejo de los diferentes programas informáticos utilizados para controlar estos instrumentos

### Respuesta en frecuencia

Un sistema óptico puede considerarse una red de dos puertos, cuya entrada es el puerto 1 y su salida es el puerto 2. En un sistema con estas características, es posible obtener su respuesta en frecuencia a partir del parámetro  $S_{21}$  de su matriz de parámetros  $S$  (matriz de Scattering) ya que el parámetro  $S_{21}$  mide la proporción de señal a la salida de la red, en el puerto 2, con respecto a la de entrada a la red, en el puerto 1.

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (5)$$

Este parámetro puede ser medido mediante un VNA (Vector Network Analyzer), cuya función principal es medir los parámetros  $S$  de una matriz de  $N$  puertos. El VNA que utilizaremos será el modelo E5071C de Agilent. Abarca un rango de frecuencias de 9 kHz hasta 4.5 GHz con un amplio rango dinámico de 130 dB y una velocidad de medida de 8 ms. El esquema de montaje se presenta en la Fig. X

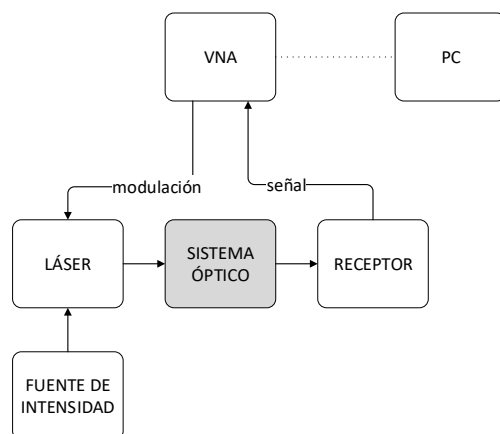


Fig. X. Esquema del montaje experimental para la medida de la respuesta en frecuencia

Para obtener el parámetro  $S_{21}$ , se conecta el puerto 1 del VNA a la entrada de modulación del láser y la de salida del receptor al puerto 2 del VNA como muestra la figura. El VNA puede ser controlado a través del software pof.m, desarrollado en [23] que permite fijar parámetros y guardar las medidas del  $S_{21}$  como vectores de Matlab en un PC. Su interfaz gráfica se muestra en la Fig. XI.

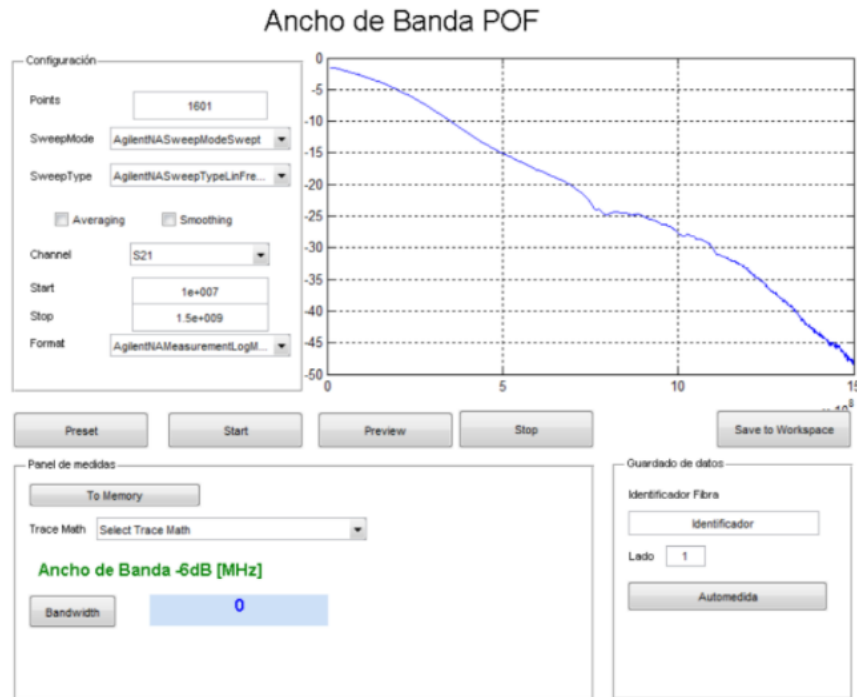


Fig. XI. Interfaz gráfica de la aplicación pof.m

Los parámetros con los que se combina la utilización de esta interfaz para la medida del parámetro S21 son los siguientes:

| Parámetro                       | Valor   |
|---------------------------------|---------|
| Número de puntos                | 1601    |
| Frecuencia start                | 10 MHz  |
| Frecuencia stop                 | 4.5 GHz |
| Potencia RF                     | -10dBm  |
| Ancho de banda del filtro de IF | 5 KHz   |

Tabla VI. Parámetros introducidos en pof.m para el cálculo del parámetro S21

Como se ha comentado, es posible obtener la respuesta en frecuencia del sistema óptico a partir del parámetro S21, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$H(f) = \frac{S21(f) - \max(S21(f))}{2} \quad (7)$$

Sin embargo, la respuesta en frecuencia obtenida en (7) incluye también las limitaciones introducidas por la electrónica del sistema, es decir, del detector y del láser. Por este motivo, es necesario contar con una medida de respuesta en frecuencia de referencia, que refleje únicamente la electrónica del sistema. Esta medida suele obtenerse utilizando el sistema reflejado en la figura, solo que se sustituye el sistema óptico por un tramo muy corto (entre 1 y 2 metros de longitud), de forma que los efectos de dispersión que pueda introducir sean despreciables. La respuesta de la fibra larga (20 metros) se obtiene como

$$H(f)_{sist.óptico} = H(f)_{sist.completo} - H(f)_{electrónica} \quad (8)$$

## Medida de patrón de campo lejano (FFP)

Para caracterizar la distribución espacial de intensidad observaremos dos parámetros:

- FFP (Far Field Pattern): Distribución de intensidad en un plano lo suficientemente alejado al extremo de la fibra.
- EAF (Encircled Angular Flux): Cociente de un arbitrario flujo de radiación dentro de un ángulo sólido dado, y el flujo total.

En nuestro caso, mediremos el FFP mediante el montaje que se define en las Fig. XII y Fig. XIII, y a partir de él calcularemos el EAF.

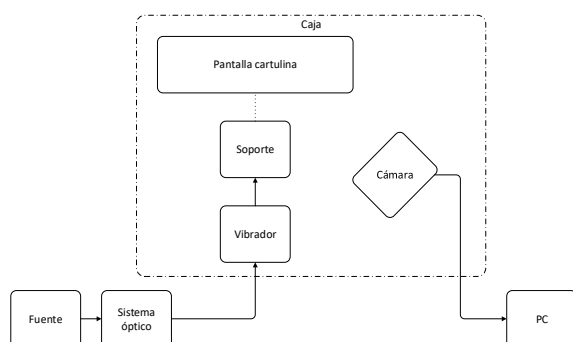


Fig. XII. Esquema de montaje para la medida del FFP

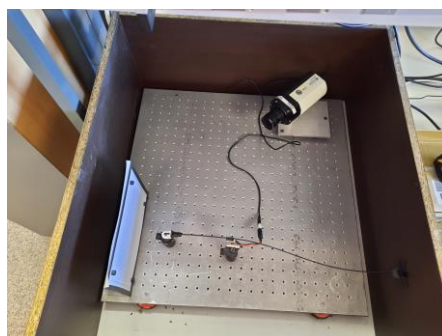


Fig. XIII. Montaje físico para la medida del FFP

El componente principal es una cámara conectada al ordenador que apunta con un ángulo de  $45^\circ$  a una pantalla de papel blanca. El objetivo de esta pantalla es reflejar el haz de luz emitido por el extremo de una fibra situado a una distancia conocida. Así, la cámara recoge este reflejo y mediante el programa desarrollado en LabView® MedidasAngulares se procesa la imagen, obteniendo el valor del FFP (Fig. XIV).

La interfaz del programa muestra, en la parte superior izquierda, la imagen captada por la cámara para un ángulo de  $0^\circ$ , y su perfil radial (máximo en rojo, promedio en blanco y mínimo en verde) en la parte superior izquierda. En la parte inferior de la pantalla, se muestra una umbralización de la imagen captada por la cámara y una medida simetrizada del perfil radial.

Además permite seleccionar el número de imágenes que se desean guardar e introducir un directorio de guardado. Por otro lado, permite controlar algunos parámetros como la posición del centroide, importante para realizar un alieneamiento correcto de la fibra frente a la pantalla; la posición del ángulo; y los parámetros de control de la cámara, como el tiempo de exposición.

Por último, el programa genera tres tipos de fichero al guardar las medidas: un fichero .tiff con la imagen, un .dat con el perfil radial para cada ángulo, y un .cfg con los parámetros introducidos en el programa.

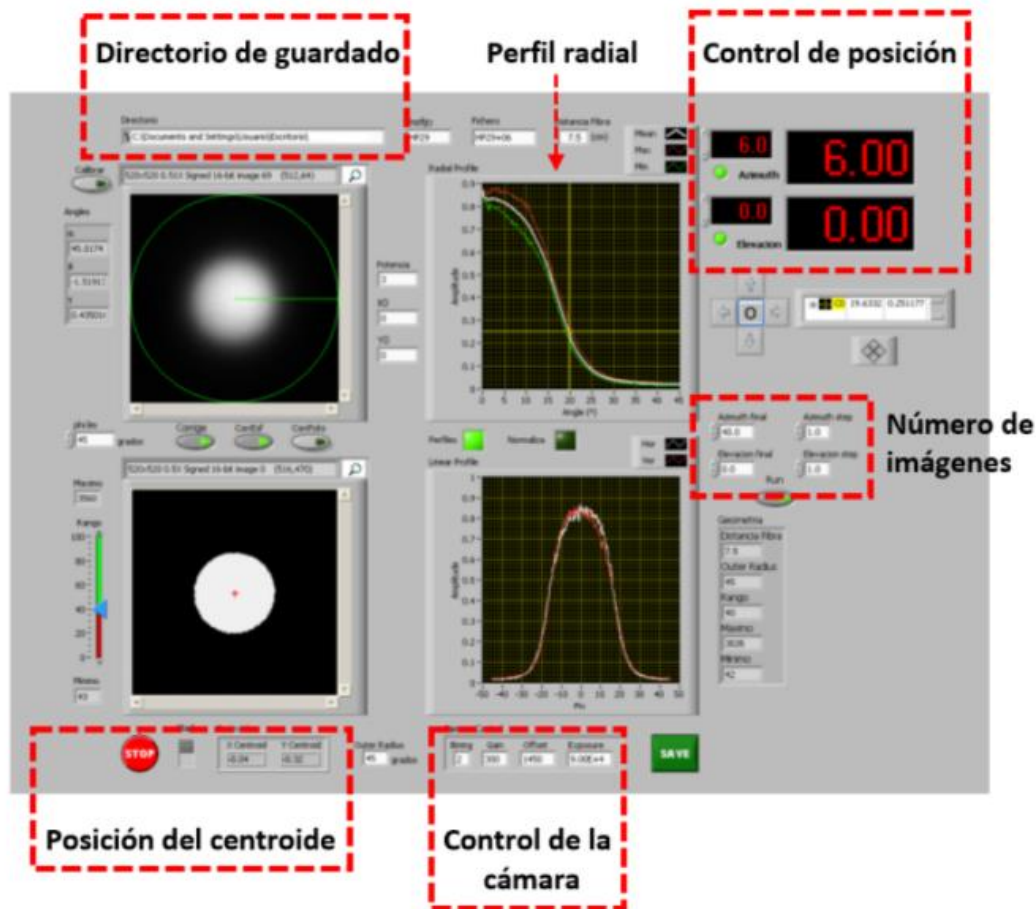


Fig. XIV. Interfaz del programa MedidasAngulares

Para aumentar la calidad de esta medida, se añaden ciertos elementos extra. Para que las FFP se calculen sin tener en cuenta la luz exterior, el montaje completo se sitúa dentro de una caja totalmente aislada. Además, para evitar y promediar el ruido granular que producen las fuentes ópticas, se utiliza un vibrador que cambia ligeramente la posición del haz de luz en la pantalla. Con esto conseguimos medidas más suavizadas.

### Medidas de BER

El BER (Bit Error Rate) es un parámetro muy importante a la hora de conocer la capacidad de transmitir información dentro de un sistema de comunicaciones. Define la tasa de error de bit, es decir, el porcentaje de bits que se reciben de forma errónea el receptor tras una determinada comunicación. Normalmente, este parámetro es utilizado para fijar las condiciones del sistema. Se establece una BER máxima, que representará la calidad mínima del sistema, y se modifican el resto de parámetros, como la potencia inyectada o la tasa de bit, hasta llegar a esta BER. Tendremos menores errores de bit si aumentamos la potencia inyectada o si reducimos la tasa de bit.

Por tanto, el BER se podrá obtener inyectando una secuencia conocida de bits en un sistema óptico y cuantificando en detección cuántos errores ha habido a partir de la señal recibida. El dispositivo que utilizaremos para llevar a cabo esta medida es el OPTOBER, un medidor de BER

que permite modular la señal de un láser con una señal pseudo-aleatoria y actuar como detector en la señal recibida tras el sistema óptico. Se encarga de comparar estas dos señales y definir el error entre ellas. El esquema de conexionado se define en la siguiente figura.

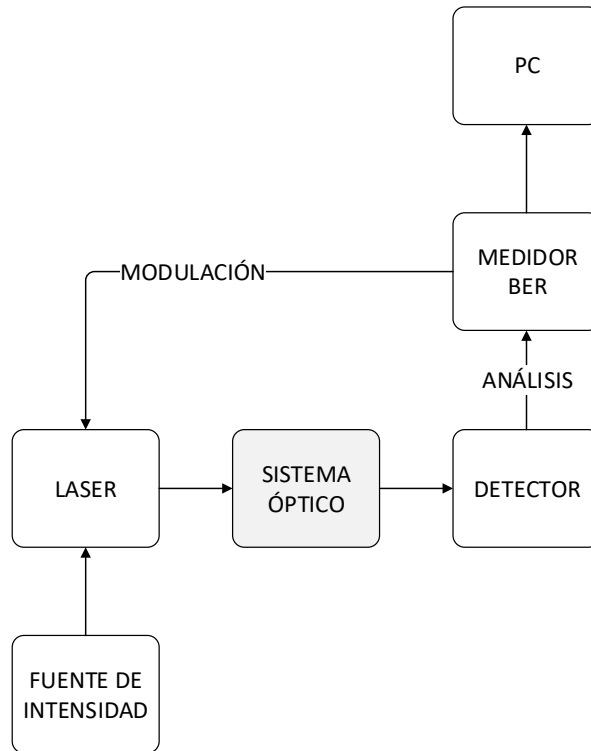


Fig. XV. Esquema de montaje para la medida del BER

El OPTOBER se controla mediante un programa desarrollado en LabView, con el que se pueden realizar medidas puntuales y barridos en función de la tasa de bit. Permite fijar diferentes parámetros, como la tasa inicial, la final, el paso, o el tipo de modulación para la señal inyectada.

La interfaz está dividida en cuatro bloques principales (Fig. XVI). El primero permite realizar las configuraciones relacionadas con la señal inyectada, como la modulación o la tasa de bit. A su derecha, se muestra la configuración del modo barrido, donde es posible introducir los valores para llevar a cabo el barrido de tasa. En la parte inferior de la pantalla, se muestran los resultados. A la izquierda, se observan los valores de BER numéricamente, y a la derecha, quedan representados en una gráfica.

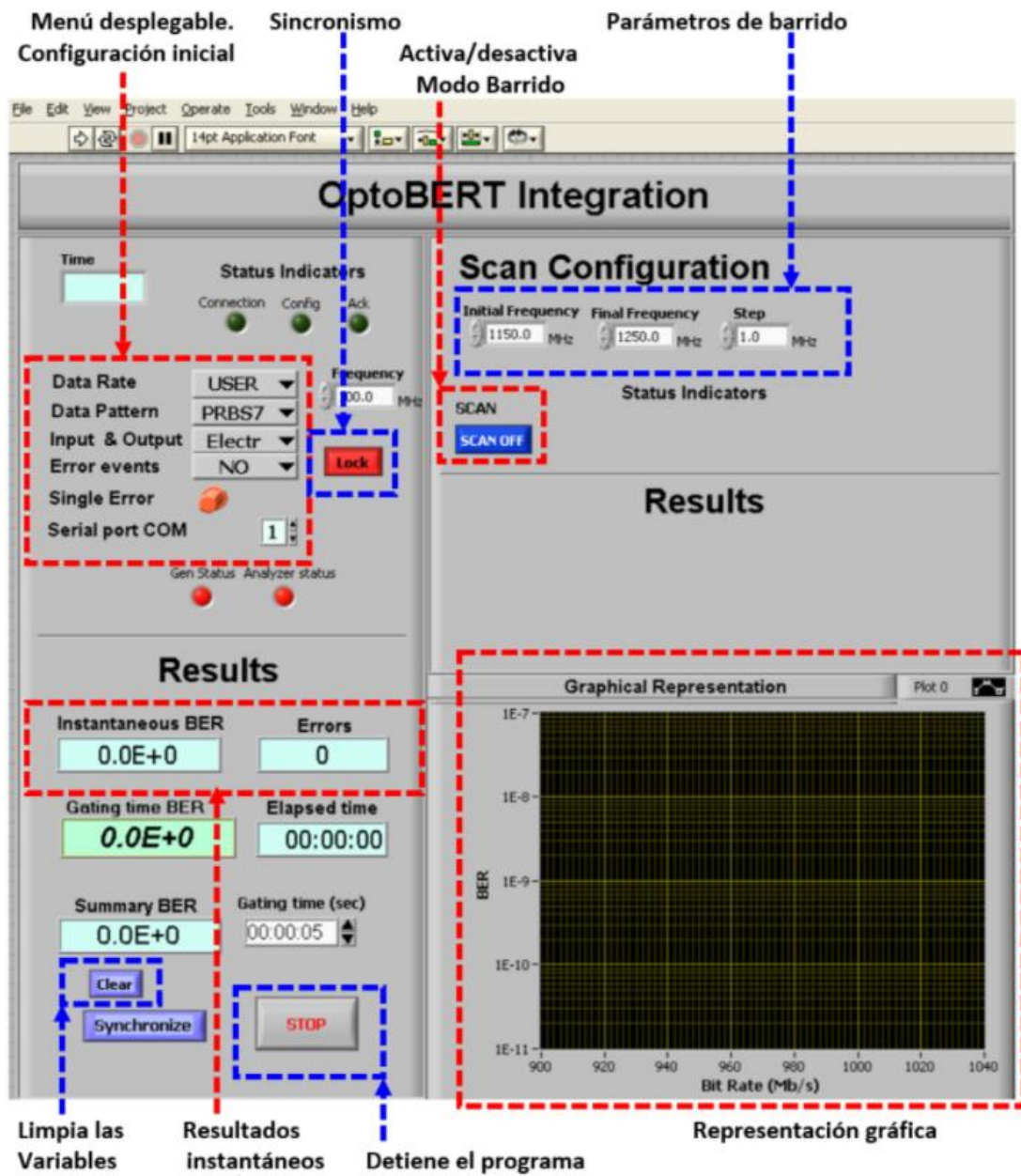


Fig. XVI. Interfaz de usuario del programa controlador del OPTOBER

## Anexo V. Código desarrollado

Funciones y código para el control del medidor de potencia.

```
h=instrhwinfo('visa','ni','usb'); %Listado de instrumentos con
comunicación VISA, NI ó USB

if isempty(h.ObjectConstructorName) %Si no se encuentra ningún elemento,
descartamos la comunicación

    delete h;
else

    g=extractBetween(h.ObjectConstructorName,'USB','INSTR',
'Boundaries','inclusive');

    d = icdevice('PM100USB', g{1}); %Se crea el objeto para el
instrumento

    if (d.Status == 'closed')
        connect(d);
        disp(d);
    end
end
end
```

| Función       | Grupo                                 | Descripción   |
|---------------|---------------------------------------|---|
| measPower     | Data                                  | Inicia un nuevo ciclo de medida de potencia y devuelve el valor de la potencia medida |
| getAvgCnt     | Configurationfunctionssenseaverage    | Devuelve la cuenta media de la generación del valor de medida                         |
| setwavelength | Configurationfunctionssensecorrection | Establece la longitud de onda introducida por el usuario                              |

Código de la aplicación de Matlab

Propiedades

```
properties (Access = private)
    puerto = 'COM3' % Puerto de conexión del arduino
    landa = 520 % Longitud de onda de trabajo
    filtro % Filtro neutro seleccionado
    monitorizacion = false; % Indica si trabajamos en modo
monitorización
```



```

    pasos = 2048 % N° de iteraciones que definen un
giro completo
    calibracion = zeros(1,2048); % Curva de calibracion
    at = 0; %
Define la atenuación actual estimada
    angle = linspace(1,360,2048); % Eje correspondiente a la curva
de calibración
    P_in = 0; % Potencia inyectada (cuando at =
0dB)
    angulo_actual = 0; % Estimación del ángulo actual
dentro del eje angle
    cal_done = false; % Indica si existe una curva de
calibración válida
    at_done = false; % Indica si el giro para la
atenuación se ha llevado a cabo
    last_power = 0; % Nivel de potencia anterior

    iniciado = false; % Indica si hay un barrido en curso
    barrido = 0; % Define los puntos de atenuación
para los que hay que medir dentro del modo barrido
    cont_barrido = 1; % Número de puntos tomados en el
modo barrido
    param_barrido = 0; % Parámetro que se está midiendo
(BER, V, etc.)

    ac13 = 0; % Tasa de acoplo entre la entrada
y el sistema óptico
    ac14 = 0; % Tasa de acoplo entre la entrada
y el medidor de potencia
end

```

## Funciones

```

methods (Access = private)
%angulo = calc_angle()
%calcula el ángulo actual en el que se encuentra el NDF según la
%potencia medida. Solo funciona en modo monitorización
function angulo = calc_angle(app)
[h_data, h_conf] = app.conf_medir();
P_actual = 10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30;
at_actual = P_actual - app.P_in;
vector = abs(app.calibracion-at_actual);
[m,i] = min(vector);
angulo = mod((app.angle(i)+360),360);
end
%ax = eje(curva)
%calcula el eje angular según la posición de la máxima diferencia
%de atenuaciones tomadas en una curva de atenuación
function ax = eje(app, curva)
[m, i] = max(diff(curva)); %Encontramos la posición del cero en un eje
de PASOS muestras

```

```

ax = -(i-1):(app.pasos-i);
ax = ax*360/app.pasos;
ax(i)
end
 %[h_data, h_conf] = conf_medir(app)
 %Realiza las configuraciones previas del medidor de potencia. Se
 % llama a esta funcion antes de empezar a medir la potencia óptica
 function [h_data, h_conf] = conf_medir(app)
 h_conf=get(app.d, 'Configurationfunctionssenseaverage');
 h_data=get(app.d, 'Data');
 end
 %[] = lamps()
 %Actualiza los elementos del panel "Estado del sistema" según se
 %hayan llevado a cabo los procesos de calibración o atenuación
 function results = lamps(app)
 if(app.cal_done)
 app.CalibracinOKLamp.Color = [0.00,1.00,0.00];
 else
 app.CalibracinOKLamp.Color = [0.80,0.80,0.80];
 end
 if(app.at_done)
 app.AtenuacinOKLamp.Color = [0.00,1.00,0.00];
 else
 app.AtenuacinOKLamp.Color = [0.80,0.80,0.80];
 end
 end
 %[] = calibrar()
 %realiza el algoritmo de calibración. Realiza una iteración de
 %PASOS en la que toma un valor de potencia óptica a cada paso, y lo
 %almacena en el vector calibracion. Cuando termina, determina la
 %potencia inyectada, normaliza los resultados para expresar la
 %curva en función de la calibración, estima el eje angular y
 %representa la curva en los ejes habilitados para ello.
 function results = calibrar(app)
 app.cal_done = false;
 app.lamps(); %actualización de la situación del sistema
 [h_data, h_conf] = app.conf_medir();
 app.calibracion = invoke(h_conf, 'getAvgCnt');
 for i=1:app.pasos
 app.calibracion(i)=10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30;
 %pause(ts)
 write(app.obj1, '1', 'char');
 if app.monitorizacion
 % Se muestran en el panel indicador los valores de
 % potencia recibidos
 app.Potencia_recibida.Text = num2str(app.calibracion(i));
 app.Potencia_sistema.Text = num2str(app.calibracion(i)-
 app.ac14+app.ac13);
 end
 end
 write(app.obj1, '0', 'char');
 app.last_power = app.calibracion(end);
 app.P_in = max(app.calibracion);

```

```

app.calibracion = app.calibracion-app.P_in;
app.angle = eje(app, app.calibracion);
plot(app.UIAxes, app.angle, app.calibracion)
if app.monitorizacion
[h_data, h_conf] = app.conf_medir();
P_actual = 10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30;
at_actual = P_actual - app.P_in;
vector = abs(app.calibracion-at_actual);
[m,i] = min(vector);
app.angulo_actual = mod((app.angle(i)+360),360);
end
app.cal_done = true;
app.lamps(); %actualización de la situación del sistema
%Eliminamos los warnings relacionados con la falta de curva de
% calibración, si existen
app.WarningAtenuacion.Text = '';
app.WarningBarrido.Text = '';
end

% []= recalibrar(atenuacion)
% Comprueba si la atenuación recibida mediante el medidor de
% potencia es cercana a la calculada, con un error de +-0.5dB.
% Si excede este margen, vuelve a realizar una calibración. Esta
% función solo debe ser llamada cuando esté activo el modo
% monitorización
function results = recalibrar(app, atenuacion)
h_data = app.conf_medir();
actual_power = 10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30;
pin_estimada = actual_power - atenuacion;
if((actual_power>app.last_power+0.5)|| (actual_power<app.last_power-
0.5))
app.cal_done = false;
elseif (pin_estimada>app.P_in+0.5)|| (pin_estimada<app.P_in-0.5)
app.cal_done = false;
end
app.lamps();
end
% [] = setLanda(landa)
% Configura el medidor de potencia con la longitud de onda
% introducida
function results = setLanda(app, landa)
h_setup = get(app.d, 'Configurationfunctionssensecorrection');
        methods(h_setup)
        invoke(h_setup, "setwavelength", landa);

        h_data = app.conf_medir();
        app.Potencia_recibida.Text =
num2str(10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30);
        app.Potencia_sistema.Text =
num2str(10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30 - app.ac14+app.ac13);
end

```

```

    % [] = atenuar(at)
    % atenúa la atenuación (en dB) introducida.
    % en primer lugar, se recalibra el atenuador si es necesario y
se
    % realiza una traducción entre la atenuación introducida y el
    % número de pasos que se deben dar a partir de la curva de
    % calibración
    function results = atenuar(app, at)
        app.at_done = false;
        if(app.monitorizacion)
            app recalibrar(app.at);
            if(~app.cal_done)
                app.calibrar();
            end
        end

        app.at = -at;
        [m,i] = min(abs(app.at-app.calibracion));

        angulo_at = app.angle(i);
        angulo_diferencia = mod(((angulo_at-
app.angulo_actual)+360),360);
        iteraciones = angulo_diferencia*app.pasos/360;
        if (app.monitorizacion)
            h_data = app.conf_medir();
        end

        for i=1:iteraciones
            if (app.monitorizacion)
                app.last_power =
10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30;
                app.Potencia_recibida.Text =
num2str(app.last_power);
                app.Potencia_sistema.Text = num2str(app.last_power -
app.ac14 + app.ac13);
            end
            write(app.obj1, '1', 'char');

        end

        write(app.obj1, '0', 'char');
        app.at_done = true;
        app.lamps();
    end
end

```

Callbacks de ejecución y cierre

```

% Code that executes after component creation
function startupFcn(app)

```

```

        %Inicialización de la conexión con Arduino
        puertos = serialportlist('available');
        app.PuertoAtenuadorDropDown.Items = puertos;
        app.obj1 = serialport(app.PuertoAtenuadorDropDown.Value,
9600);

        app.lamps();

    end

% Close request function: UIFigure
function UIFigureCloseRequest(app, event)

    % Desconectamos el detector
    if app.monitorizacion
        disconnect(app.d);
        delete(app.d);
        clear app.d;
    end

    delete(app)

end

```

Callbacks dentro del menú "General"

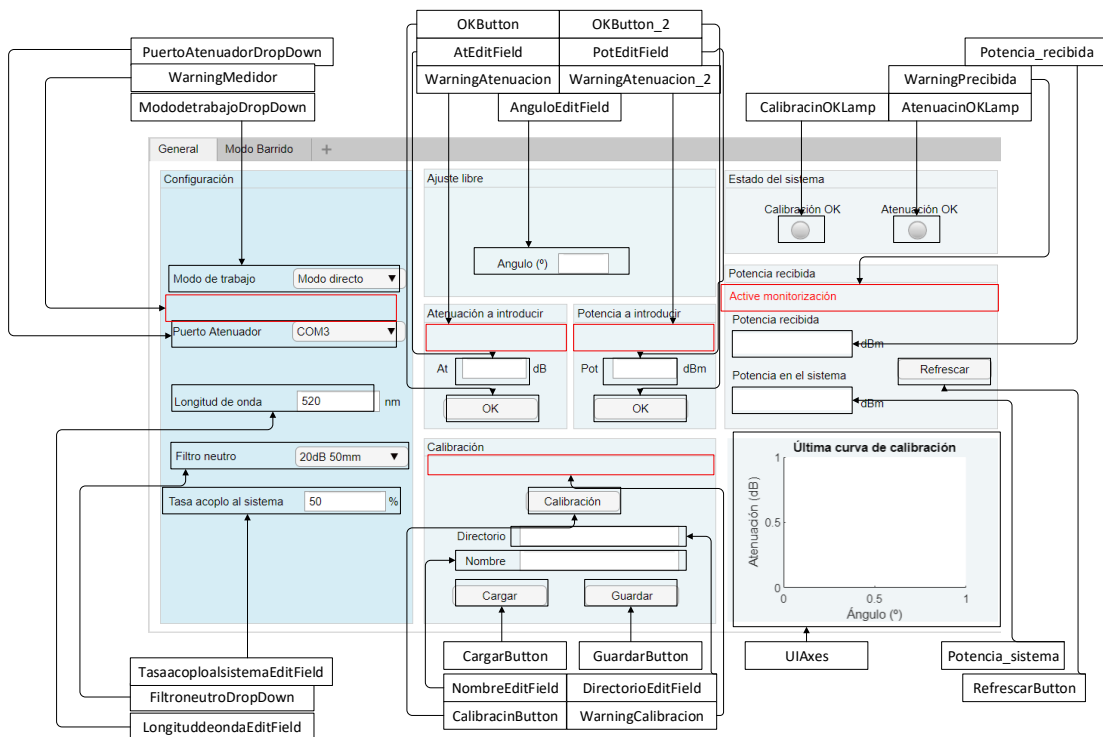


Fig. XVII. Nombres de los objetos interactivos de la pestaña "General"

```

% Value changed function: MododetrabajoDropDown
function MododetrabajoDropDownValueChanged(app, event)
    %value = app.MododetrabajoDropDown.Value;
    app.monitorizacion = ~app.monitorizacion;

```

```

        if (app.monitorizacion) %Se ha seleccionado modo
monitorizacion

        %En este modo tenemos conectado siempre el power meter.
        %Podemos tomar medidas de potencia, introducir un
        %acoplador...

        %Conexión con Power Meter

        h=instrhwinfo('visa','ni','usb');
        if(isempty(h.ObjectConstructorName)) %Se intenta
        % seleccionar modo monitorizacion pero no se
encuentra el medidor
            app.WarningMedidor.Text = 'Conecte el medidor';
            app.MododetrabajoDropDown.Value = 'Modo directo';
            app.monitorizacion = ~app.monitorizacion;
            delete h;
        else %Medidor encontrado con exito

app.g=extractBetween(h.ObjectConstructorName, 'USB', 'INSTR', 'Boundaries'
, 'inclusive');

            app.d = icdevice('PM100USB',app.g{1});
            if (app.d.Status == 'closed')
                connect(app.d);
                disp(app.d);
            end
            %Reseteo de los Warnings
            app.setLanda(app.landa);
            app.WarningMedidor.Text = '';
            app.WarningAtenuacion.Text = '';
            app.WarningCalibracion.Text = '';
            app.WarningBarrido.Text = '';
            app.WarningPrecibida.Text = '';
        end
    else %Se ha seleccionado modo directo
        app.WarningPrecibida.Text = 'Active modo monitorización'
        disconnect(app.d);
        delete(app.d);
        clear app.d;
    end
end
end

```

```

% Value changed function: PuertoAtenuadorDropDown
function PuertoAtenuadorDropDownValueChanged(app, event)
    value = app.PuertoAtenuadorDropDown.Value; %Cambio de puerto
    %serie
    app.obj1 = serialport(value, 9600);
end

```

```

% Value changed function: LongituddeondaEditField
function LongituddeondaEditFieldValueChanged(app, event)

```

|  |
|--|
| <pre> value = app.LongituddeondaEditField.Value; app.landa = str2double(value);  app.setLanda(app.landa); end </pre>   |
| <pre> % Value changed function: TasaacoploalsistemaEditField function TasaacoploalsistemaEditFieldValueChanged(app, event) value = str2double(app.TasaacoploalsistemaEditField.Value) app.ac13 = 10*log10(value/100); app.ac14 = 10*log10((100-value)/100); end </pre>   |
| <pre> % Value changed function: AnguloEditField function AnguloEditFieldValueChanged(app, event) app.cal_done = false; app.at_done = false; app.lamps(); %Se pierde la calibración y la atenuación %anteriores  value = str2double(app.AnguloEditField.Value); iteraciones = value*app.pasos/360; if app.monitorizacion [h_data, h_conf] = app.conf_medir(); end  for i = 1:iteraciones if app.monitorizacion out = 10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30; app.Potencia_recibida.Text = num2str(out); app.Potencia_sistema.Text = num2str(out-app.ac14 + app.ac13) end write(app.obj1, '1', 'char'); end end </pre> |
| <pre> % Button pushed function: OKButton function OKButtonPushed(app, event) if (app.monitorizacion) app.atenuar(str2double(app.AtEditField.Value)) else if (app.calibracion == zeros(1,app.pasos)) app.WarningAtenuacion.Text = 'No existe curva de precalibración' else app.atenuar(str2double(app.AtEditField.Value)) end end end </pre>  |
| <pre> % Button pushed function: OKButton_2 function OKButton_2Pushed(app, event) </pre>  |

```

        if (app.monitorizacion)
            if (app.P_in == 0)
                app.WarningAtenuacion_2.Text = 'Es necesario
calibrar'
            else
                disp(app.P_in)
                at = app.P_in - str2double(app.PotEditField.Value);
                app.atenuar(at)
            end
        else
            if (app.calibracion == zeros(1,app.pasos))
                app.WarningAtenuacion_2.Text = 'No existe curva de
precalibración'
            else
                app.atenuar(str2double(app.AtEditField.Value))
            end
        end
    end
end

```

```

% Button pushed function: CalibracinButton
function CalibracinButtonPushed(app, event)
    if (app.MododetrabajoDropDown.Value == "Modo directo")

        %Se busca el medidor de potencia
        h=instrhwinfo('visa','ni','usb');
        if(isempty(h.ObjectConstructorName)) %Medidor de
potencia no disponible
            app.WarningCalibracion.Text = 'Conecte el medidor
para precalibrar';
            delete h;
        else %Se inicializa la conexión con el medidor de
potencia
            app.WarningCalibracion.Text = '';

app.g=extractBetween(h.ObjectConstructorName,'USB','INSTR','Boundaries'
,'inclusive');

            app.d = icdevice('PM100USB',app.g{1});
            %app.d = icdevice('PM100USB','ASRL3::INSTR');
            if (app.d.Status == 'closed')
                connect(app.d);
                disp(app.d);
                app.setLanda(app.landa);
                app.calibrar();
                disconnect(app.d);
            end

            delete(app.d);
            clear app.d;

        end
    else % Modo monitorización
        app.calibrar();
    end
end

```



```
end
```

```
% Button pushed function: CargarButton
function CargarButtonPushed(app, event)

    directorio = app.DirectorioEditField.Value
    nombre = app.NombreEditField.Value;
    % Se busca el archivo de calibracion. Debe ser un archivo
    .mat
    % que contenga un vector [2 PASOS], donde la primera fila es
    el
    % ángulo y la segunda, la atenuación
    if (isempty(directorio))
        ruta = [nombre '.mat']
    else
        if directorio(end) ~= '\\'
            directorio = [directorio '\\']
        end
        ruta = [directorio nombre '.mat']
    end

    v = load(ruta)
    v = cell2mat(struct2cell(v));
    if (size(v) == [2 2048])
        app.WarningCalibracion.Text = '';
        app.angle = v(1,:);
        app.calibracion = v(2,:);
        plot(app.UIAxes, app.angle, app.calibracion);
        app.WarningAtenuacion.Text = '';
        app.WarningBarrido.Text = '';
        app.angulo_actual = app.angle(1,1);
    else
        app.WarningCalibracion.Text = 'Archivo no válido';
    end
end
```

```
% Button pushed function: GuardarButton
function GuardarButtonPushed(app, event)
    % Guarda la última curva de calibración en un fichero .mat
    con
    % un vector [2 PASOS]
    directorio = app.DirectorioEditField.Value;
    if directorio(end) ~= '\\'
        directorio = [directorio '\\']
    end

    if(~isfolder(directorio))
        mkdir(directorio)
    end
    nombre = app.NombreEditField.Value;

    ruta = [directorio nombre '.mat']
```

```

        cal = [app.angle; app.calibracion];
        save(ruta, 'cal')
    end

% Button pushed function: RefrescarButton
function RefrescarButtonPushed(app, event)
    if (app.monitorizacion)
        [h_data, h_conf] = app.conf_medir();
        out = 10*log10(invoke(h_data, 'measPower'))+30;
        app.Potencia_recibida.Text = num2str(out);
        psist = out + app.ac13 -app.ac14;
        app.Potencia_sistema.Text = num2str(psist);
    else
        app.WarningPrecibida.Text = 'Active modo monitorización'
    end
end
end

```

### Callbacks dentro del menú “Modo Barrido”

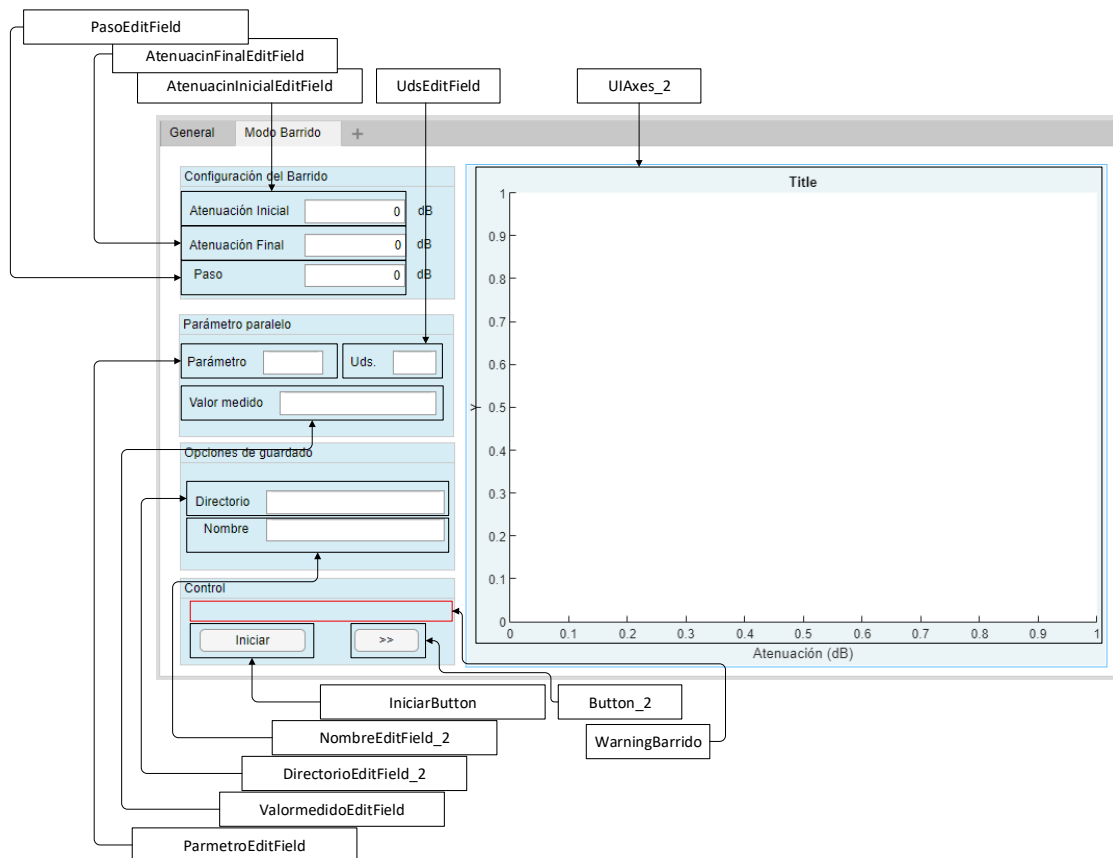


Fig. XVIII. Nombres de los objetos interactivos de la pestaña "Modo barrido"

```

% Value changed function: ParmetroEditField
function ParmetroEditFieldValueChanged(app, event)
    value = app.ParmetroEditField.Value;
    label = [value ' (' app.UdsEditField.Value ')'];
    ylabel(app.UIAxes2, label);

```

```

end

% Value changed function: UdsEditField
function UdsEditFieldValueChanged(app, event)
    value = app.UdsEditField.Value;
    label = [app.ParmetroEditField.Value ' (' value ')'];
    ylabel(app.UIAxes2,label);
end

% Button pushed function: IniciarButton_2
function IniciarButton_2Pushed(app, event)
    if (~app.monitorizacion)
        if (app.calibracion == zeros(1,app.pasos))
            app.WarningBarrido.Text = 'No existe curva de
precalibración';
        end
    else
        app.iniciado = true;

        inicio = app.AtenuacinInicialEditField.Value
        final = app.AtenuacinFinalEditField.Value
        step = app.PasoEditField_2.Value

        titulo = [app.ParmetroEditField.Value ' frente a
Atenuación']
        title(app.UIAxes2,titulo)

        app.barrido = inicio:step:final
        app.atenuar(inicio)
    end
end

% Button pushed function: IniciarButton
function IniciarButtonPushed(app, event)
    if (~app.monitorizacion)
        if (app.calibracion == zeros(1,app.pasos))
            app.WarningBarrido.Text = 'No existe curva de
precalibración';
        end
    else
        app.iniciado = true;

        inicio = app.AtenuacinInicialEditField.Value
        final = app.AtenuacinFinalEditField.Value
        step = app.PasoEditField_2.Value

        titulo = [app.ParmetroEditField.Value ' frente a
Atenuación']
        title(app.UIAxes2,titulo)

        app.barrido = inicio:step:final
        app.atenuar(inicio)
    end
end

```

```

        end
    end

% Button pushed function: Button_2
function Button_2Pushed(app, event)
    if (app.iniciado)
        barrido = app.barrido(1:app.cont_barrido)

        parametro = [app.param_barrido
str2double(app.ValormedidoEditField.Value)]
        plot(app.UIAxes2, barrido, parametro, '-o');

        if(app.cont_barrido == length(app.barrido))
            directorio = app.DirectorioEditField_2.Value;
            if directorio(end) ~= '\\'
                directorio = [directorio '\\']
            end

            if(~isfolder(directorio))
                mkdir(directorio)
            end
            nombre = app.NombreEditField_2.Value;

            ruta = [directorio nombre '.mat']
            cal = [barrido; parametro];
            save(ruta, 'cal')

            app.iniciado = false;
        else
            app.atenuar(app.barrido(app.cont_barrido));
            app.cont_barrido = app.cont_barrido + 1;
        end
    end
end
end

```

## Código de Arduino

```

Librerías y variables globales

/*
 * Este programa implementa la comunicación con la interfaz de usuario física y con el
 programa de Matlab con
 * el motor bipolar. Mediante la recepción de señales I2C y comunicación serial, controla el
 giro del motor,
 * conectado a través de una etapa de potencia a sus entradas digitales.
 *
 */

```

```

* PINOUT

*

* A4: Señales de reloj (SCL) del teclado matricial (0x38) y de la pantalla OLED (0x3C)
* A5: Señales de datos (SDA) del teclado matricial (0x38) y de la pantalla OLED (0x3C)
*

* D10-D13: Etapa de potencia previa al motor bipolar
*

*/

#include <Stepper.h>

#include <Keypad_I2C.h>

#include <Keypad.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_SH1106.h>

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_SSD1306.h>

// #include <EEPROM.h>

/*Direcciones de memoria I2C*/

#define TECLADO_ADDR 0x38

#define OLED_ADDR 0x3C

/*Constantes relacionadas con el tamaño de letra del display*/

#define ESP_VERTICAL 10

#define ESP_HORIZONTAL 6

/*Pasos del motor bipolar*/

#define PASOS 2048

/*Valor inverso de la pendiente de la función de la densidad óptica con el giro*/

```

```

#define m_1 134.95

/*Variables de selección del modo de funcionamiento*/

#define MODO_CALIBRACION 1 // solo importa si !MODO_ORDENADOR. Si 1, el motor gira
hasta que se pulse 0
#define MODO_ORDENADOR 1 // 1 si se desea utilizar la interfaz física

//-----
//Variables globales para el teclado
//-----

const byte FILAS = 4;
const byte COLUMNAS = 4;

char teclas[FILAS][COLUMNAS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

byte PinsFilas[FILAS] = {0,1,2,3};
byte PinsColumnas[COLUMNAS] = {4,5,6,7};

Keypad_I2C kpd = Keypad_I2C( makeKeymap(teclas), PinsFilas, PinsColumnas, FILAS,
COLUMNAS, TECLADO_ADDR ); //definimos el teclado

```

```

//-----
//-----
//Variables globales para pantalla OLED
//-----
//-----

Adafruit_SH1106 display(-1); // -1 porque en esta pantalla no hay reset
int x = 0; int y = 0;

//-----
//-----
//Variables globales para el motor
//-----
//-----

Stepper motor(PASOS, 10, 11, 12, 13); //Se definen los pasos y los pines digitales donde
conectaremos el motor

//-----
//-----
//Variables globales auxiliares para modo ordenador
//-----
//-----

int tecla_ascii = 0;
int pasos = 0;
int angulo = 0;
int acu_pasos = 0;
bool on = true;
byte gira = 48;
int cont = 0;

//-----
//-----
//Variables globales auxiliares para modo físico

```

```
//-----
-----

char ch_at[5] = {'0', '0', '.', '0', '0'};

int cont_ant = 0;

char tecla = '0';

int aux = 0;

bool dB = true;

bool intro = false;

float at = 0.0;

float at_max = 2;

float at_min = 0.04;

int angulo_ant = 0;

int giro = 0;
```

#### Método setup

```
//-----
-----

//Metodo setup: inicialización del sistema, código que se ejecuta una sola vez al principio

//-----
-----

void setup() {

    /*Inicialización del puerto serie*/
    Serial.begin(9600); //Iniciamos configuración serie para ver las teclas pulsadas

    /*Inicialización del teclado*/
    kpd.begin(); //Iniciamos el teclado
```



```

/*Iniciación de la pantalla*/
display.setTextColor(WHITE, BLACK);
display.begin(SH1106_SWITCHCAPVCC, OLED_ADDR);
display.clearDisplay();
display.display();
display.clearDisplay();
if (!MODO_CALIBRACION){
    display.setCursor(x,y);
    display.println("Atenuación: ");
    display.display();
}

/*Iniciación del motor*/
motor.setSpeed(200); // Velocidad en rpm
}

```

#### Loop

```

//-----
//Bucle principal: código que se ejecuta constantemente de forma cíclica
//-----

void loop() {

    if(!MODO_ORDENADOR){ // Si el ordenador no está conectado, se pone en marcha la
interfaz física del atenuador, estableciendo comunicaciones I2C

        if (MODO_CALIBRACION){
            giro_libre();
        }
        else{

```

```

tecla = kpd.getKey(); //Asignamos el valor devuelto por el teclado a la variable tecla

if(tecla){

    intro = proceso(intro, dB); //Se comprueba si el sistema está en modo proceso o en modo
usuario. Si está en modo proceso, se pasa a este estado

    cont_ant = cont;

    if(tecla){

        tecla_ascii = (int) tecla; //obtenemos el valor ascii del caracter pulsado

        mueve_cursor(tecla_ascii, dB); //se coloca el cursor en su posición correspondiente

        tecla_numerica(tecla_ascii, cont); //método para dibujar valores numéricos

        dB = modo(tecla_ascii); //método para asignar el modo dB o el modo lineal

        intro = fase(tecla_ascii); //ejecuta el cambio de estado, del modo usuario al modo
proceso, si es necesario

    }

    pinta_cursor(); //se pinta el cursor en la pantalla

}

}

else { //Si el ordenador está conectado, se activa la comunicación serie

while(Serial.available()>0){ //Mientras haya datos en el buffer ejecuta la función

    Serial.println("available");

    byte dato = Serial.read();

    Serial.flush();//limpiamos el serial.

    if((dato == 48) || (dato == 49)) gira = dato; //Detecta también el retorno de carro

    giro_libre();

}

}

```

```
}
```

#### Función pinta\_cursor

```
//-----  
-----  
  
//pinta_cursor(int tecla_ascii)  
//Este método pinta el cursor en la posición correcta.  
  
//-----  
-----  
  
void pinta_cursor(){  
  
    x = cont * ESP_HORIZONTAL; y = ESP_VERTICAL * 2;  
  
    if (cont_ant != cont) {  
        display.setCursor(cont_ant * ESP_HORIZONTAL, y);  
        display.print(' ');  
        display.display();  
    }  
    display.setCursor(x,y);  
    display.print('-');  
    display.display();  
  
}
```

#### Función mueve\_cursor

```
//-----  
-----  
  
//mueve_cursor(int tecla_ascii)  
  
//Este método controla el movimiento del cursor. Cuando se pulsa C se mueve a la derecha y  
cuando se pulsa D se mueve a la izquierda
```

```

// tecla_ascii: el valor ascii que toma el caracter pulsado
// dB: booleano que indica si se está trabajando en dB o no
//-----
-----

void mueve_cursor (int tecla_ascii, bool dB){
  if (tecla_ascii == 67){
    if (cont < 4){
      if(cont != 1) cont ++;
      else cont = cont+2;
    }
  }
  else if (tecla_ascii == 68){
    if (cont > 0){
      if(cont != 3) cont --;
      else cont = cont-2;
    }
  }
}

```

| Función gira_motor   |
|--|
| <pre> //----- -----  //gira_motor(int tecla_ascii) //Este método controla el movimiento del cursor. Cuando se pulsa C se mueve a la derecha y cuando se pulsa D se mueve a la izquierda  // tecla_ascii: el valor ascii que toma el caracter pulsado //----- -----  int gira_motor (int tecla_ascii, int pasos){   if (tecla_ascii == 67) { </pre> |

```

pasos = 1;
}
else if (tecla_ascii == 68){
    pasos = -1;
}

if(pasos == PASOS) pasos = 0;
else if (pasos < 0) pasos = PASOS-1;

motor.step(pasos);

return pasos;
}

```

#### Función tecla\_numerica

```

//-----
//tecla_numerica(int tecla_ascii)
//Este método controla las teclas que controlan valores numéricos: A y B (flechas vertical y
horizontal que incrementan/decrementan una
//unidad) y las teclas 0...9
// int tecla_ascii: valor en ascii del caracter de la tecla pulsada
//-----
void tecla_numerica(int tecla_ascii, int cont){
    int aux = 0;
    x = cont * ESP_HORIZONTAL; y = ESP_VERTICAL * 1;

    if((tecla_ascii >= 48) && (tecla_ascii <= 57)){ //teclas numéricas
        ch_at[cont] = tecla;
    }
}

```

```

}

if(tecla_ascii == 65){ //aumenta una unidad
    aux = (int) ch_at[cont];
    if (aux < 57) aux++;
    ch_at[cont] = (char) aux;

}

if(tecla_ascii == 66){ //decrementa una unidad
    aux = (int) ch_at[cont];
    if (aux > 48) aux--;
    ch_at[cont] = (char) aux;

}

display.setCursor(x,y);
display.print(ch_at[cont]);
display.display();
}

```

#### Función modo

```

//-----
//-----

//modo(int tecla_ascii)

//Este método define el modo de operación del atenuador: en dB o en lineal. Cambia la
interfaz de usuario según el modo de operación

// int tecla_ascii: valor en ascii del caracter de la tecla pulsada

//-----
//-----

bool modo(int tecla_ascii){
    if(tecla_ascii == 42){

```

```
dB = !dB;
x = ESP_HORIZONTAL * 6; y = ESP_VERTICAL * 1;
for (int i = 0; i < 5; i++){
    if (i != 2) ch_at[i] = '0';
    else ch_at[i] = '.';
}
if(dB){
    display.setCursor(x,y);
    display.print("dB  ");
    display.display();
} else {
    display.setCursor(x,y);
    display.print("lineal ");
    display.display();
}

x = 0; y = ESP_VERTICAL*1;
for ( int i = 0; i < 5; i++){
    display.setCursor(x,y);
    x = x + ESP_HORIZONTAL;
    display.print(ch_at[i]);
    display.display();
}
}
return dB;
}
```

```
Función fase
//-----
-----
```

```

//fase(int tecla_ascii)

//Este método indica la fase de trabajo del atenuador: si está en la fase de selección o en la
fase de trabajo

// int tecla_ascii: valor en ascii del caracter de la tecla pulsada

// return bool intro: muestra si hay que cambiar a la fase proceso o no

//-----
-----

bool fase(int tecla_ascii){
    if(tecla_ascii == 35){
        intro = true;
        x = 0; y = ESP_VERTICAL * 3;
        display.setCursor(x,y);
        display.print("OK");
        display.display();
    }
    return intro;
}

```

#### Función proceso

```

//-----
-----

//proceso(int tecla_ascii)

//Este método realiza los cálculos de atenuación y de giro, además de ejecutar el giro del
motor

// bool intro: indica si la tecla OK se ha pulsado

// bool dB: indica el modo de operación (lineal o dB)

// return bool intro: valor actualizado de la variable intro de entrada

//-----
-----

bool proceso(bool intro, bool dB){

```



```

if (intro){
  angulo_ant = angulo;
  intro = false;

  /*Obtención de la atenuación como float*/
  at = ((float)ch_at[0] - 48)*10 + ((float)ch_at[1] - 48)*1 + ((float)ch_at[3] - 48)*0.1 +
  ((float)ch_at[4] - 48)*0.01;

  //Resto a todo 48 por los números en ascii
  if(!dB) at = 10*log10(at);
  at_max = 20;
  at_min = 0.4;

  x = 0; y = ESP_VERTICAL*4;
  if((at > at_max) || (at < at_min)){
    display.setCursor(x,y);
    display.print("At max: ");
    display.print(at_max);
    display.print(" At min: ");
    display.print(at_min);
    x = 0; y =ESP_VERTICAL * 5;
    display.print(" At final: ");
    if ( at > at_max) at = at_max;
    else at = at_min;
    display.print(at);
    display.print(" dB");
    display.display();
  }
  delay(2000);
  Serial.print("Atenuación introducida: ");
  Serial.print(at);
  Serial.println(" dB");
}

```

```

/*Operar para obtener el angulo de giro*/

angulo = at*0.1*m_1 +90;

giro = (angulo-angulo_ant)%360; //restamos el valor anterior porque el motor no vuelve a
0º automaticamente

if(giro < 90) giro = 90; //evitamos la zona sin recubrimiento PREGUNTAR SOBRE ESTO

Serial.print("Angulo: ");

Serial.println(giro);

/*Funcion stepper*/

pasos = (float) giro * 360/PASOS;

motor.step(pasos);

Serial.println(pasos);

delay(1000);

x = 0; y = ESP_VERTICAL*6;

display.setCursor(x,y);

display.print("COMPLETADO");

display.display();

/*Reseteamos la pantalla*/

display.clearDisplay();

display.display();

x = 0; y = 0;

display.setCursor(x,y);

display.print("Atenuacion: ");

display.display();

x = 0; y = ESP_VERTICAL*1;

display.setCursor(x,y);

for ( int i = 0; i < 5; i ++){

    display.print(ch_at[i]);

```

```

x = x + ESP_HORIZONTAL;

display.setCursor(x,y);

display.display();

}

x = ESP_HORIZONTAL * 6;

display.setCursor(x,y);

if(dB) display.print("dB  ");

else display.print("lineal  ");

display.display();

}

return intro;

}

```

#### Función giro\_libre

```

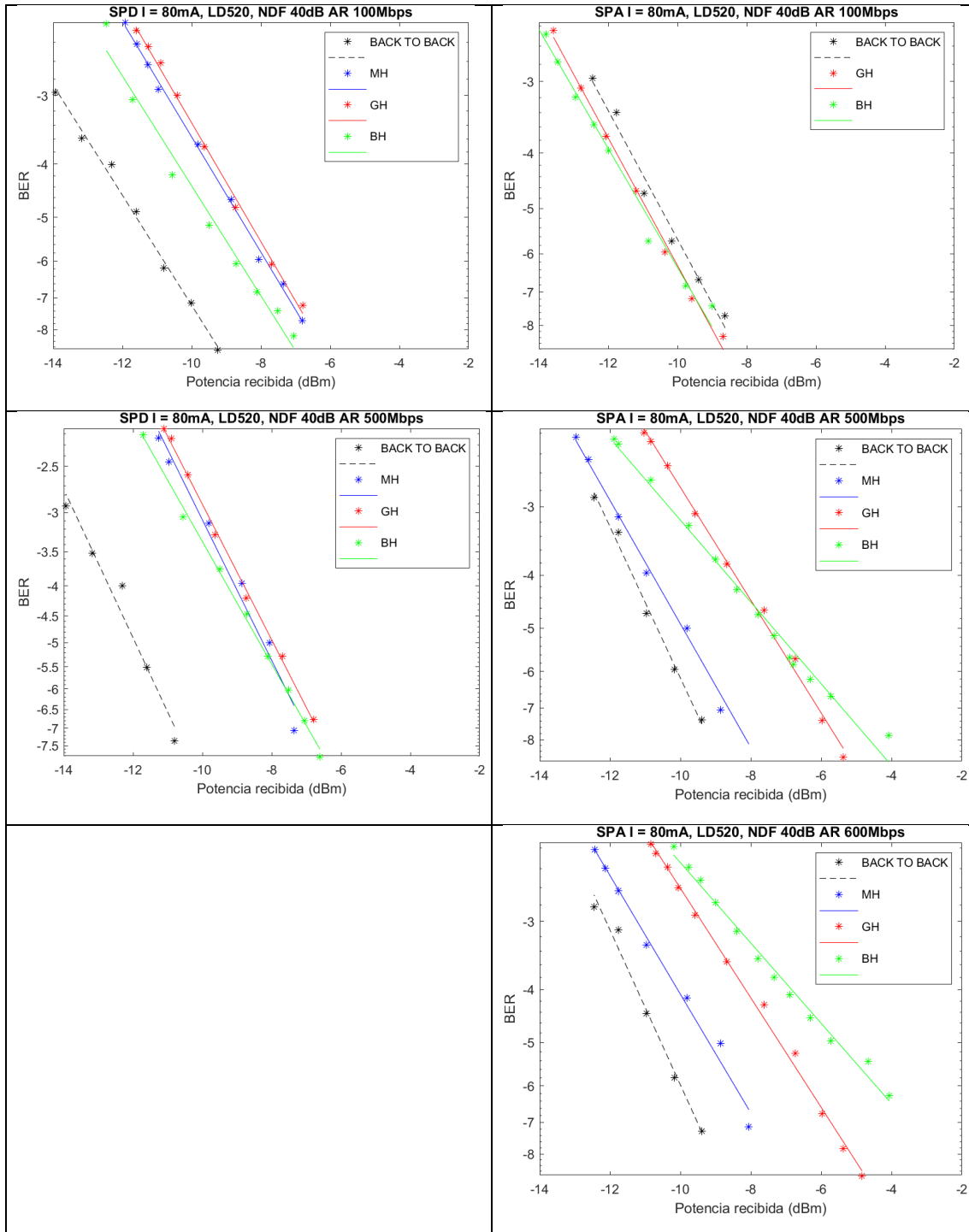
//-----
//giro_libre()
//Controla el giro de el filtro neutro, con posibilidad de controlarlo desde el ordenador o
//-----
void giro_libre(){
  if (!MODO_ORDENADOR){
    tecla = kpd.getKey(); //Asignamos el valor devuelto por el teclado a la variable tecla
    if(tecla){
      if(tecla == '0') on = !on;
    }
    if(on) {
      motor.step(1);
      //delay(3);
    }
  }
}

```

```
else {  
  if(gira!=48){  
    motor.step(1);  
  
    //delay(1);  
    cont++;  
    //Serial.print(cont);  
  }  
  else cont = 0;  
}  
}
```

## Anexo VI. Medidas de BER vs potencia recibida

Este Anexo complementa la aplicación desarrollada en el Capítulo 5, *Medidas de BER vs potencia recibida*. Como se indica en el texto, se han realizado barridos de BER frente a potencia óptica para tres sistemas ópticos diferentes, combinados con 2 detectores y diferentes tasas de bit. Por ello, a continuación se muestran todas estas medidas representadas, en primer lugar, comparando los tres sistemas ópticos (Tabla VII), y, a continuación, comparando según la tasa de bit (Tabla VIII).



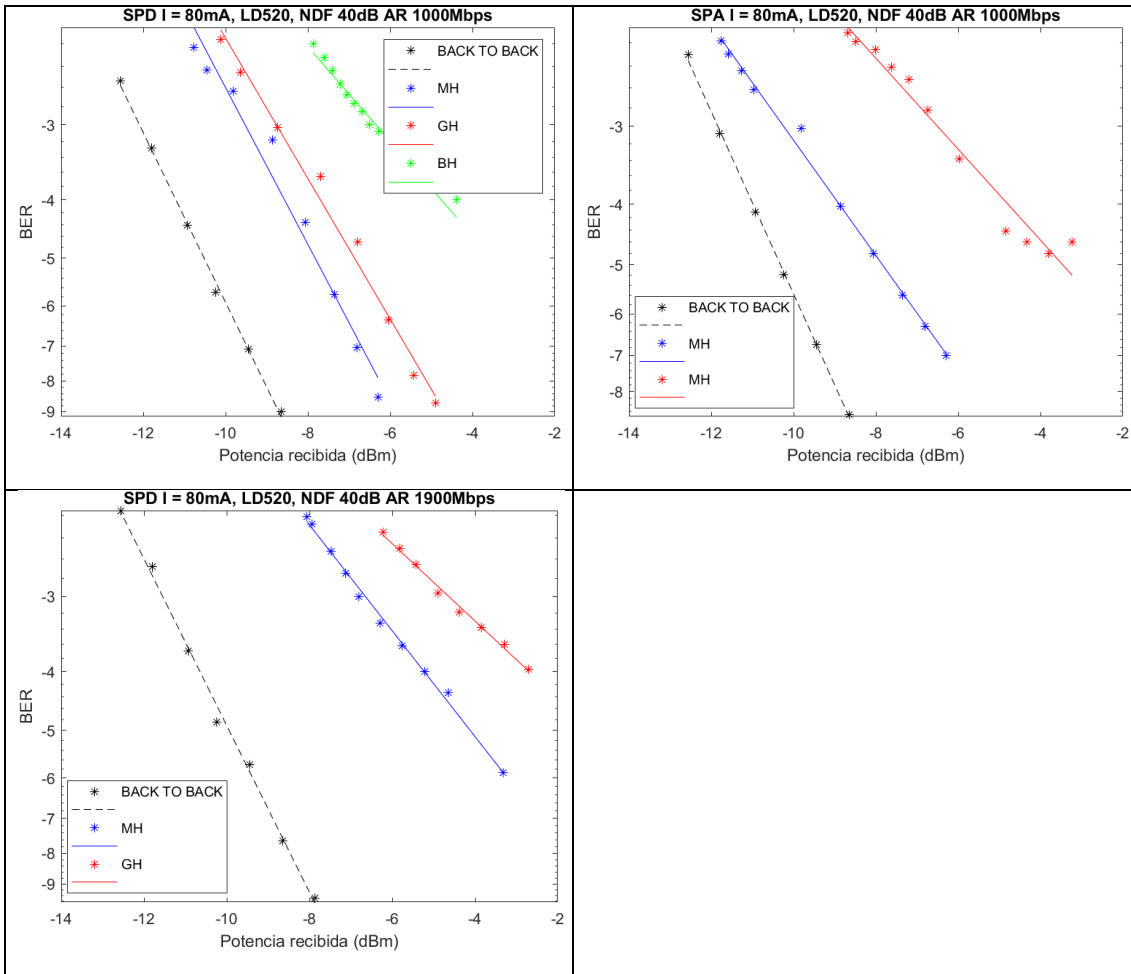


Tabla VII. Comparaciones entre los tres sistemas ópticos

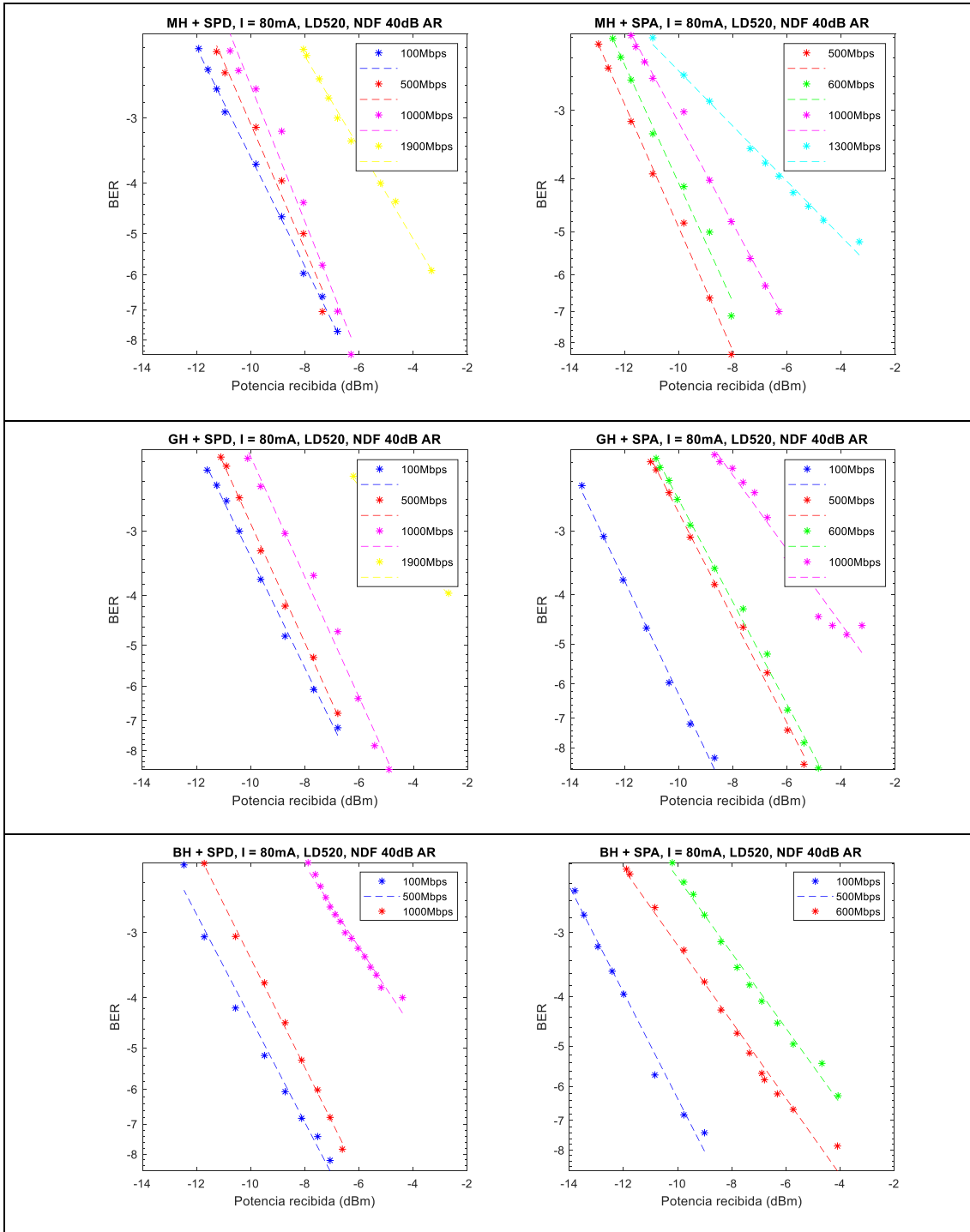


Tabla VIII. Comparaciones entre las diferentes tasas de bit

## Anexo VII. Hojas de características y manuales de instrumentos

En este Anexo, se muestran las hojas de características de los siguientes dispositivos:

|  |
|--|
| Dispositivos ópticos dentro del diseño del atenuador |
| NDF (Variable ND Filters Thorlabs)                   |
| Medidor de potencia (PM100USB Thorlabs)              |
| Sensor S150C (S150C Thorlabs)                        |
| Acopladores IFO (IFxxx Industrial Fiber Optics)      |
| Fibras ópticas de plástico                           |
| MH (MH 4001 Mitsubishi)                              |
| GH (GH 4002 Mitsubishi)                              |
| BH (BH 4001 Mitsubishi)                              |
| Dispositivos Activos                                 |
| LD520 (L520P50 Thorlabs)                             |
| LD650 (L650P007 Thorlabs)                            |
| SPA (SPA-2 Graviton)                                 |
| SPD (SPD-2 Graviton)                                 |
| Otros  |
| Atenuador variable de bloqueo (Ozoptics)             |
| Mesa óptica (MB3045/M Thorlabs)                      |



[Home](#) / [Optical Elements](#) / [Optical Filters](#) / [Neutral Density Filters](#) / [Variable ND Filters](#) / Round Continuously Variable Metallic Neutral Density Filters



## Round Continuously Variable Metallic Neutral Density Filters

- ▶ Linear, Adjustable Attenuation by Rotation
- ▶ Optical Density Range: 0.04 - 2.0, 0.04 - 4.0
- ▶ UV Fused Silica Substrate
- ▶ Uncoated and AR-Coated Versions



**NDC-50C-2**  
Ø50 mm ND Filter  
OD: 0.04 - 2.0



**NDC-100C-4M**  
Mounted Ø100 mm ND Filter  
OD: 0.04 - 4.0



**NDC-50C-2 Variable ND Filter**  
Mounted on Ø1/2" Post  
Using an NDC-PM Mount

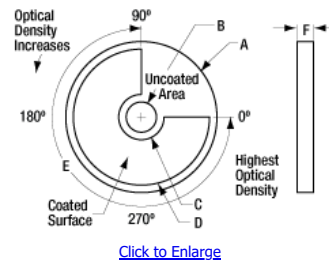
### Related Items

- Non-Variable ND Filters
- Filter Mounts
- Picosecond Microchip Laser
- Liquid Crystal Noise Eater

[Overview](#) [Specs](#) [Graphs](#) [Damage Thresholds](#) [LIDT Calculations](#) [Smart Pack](#) [Feedback](#)

| Common Specifications               |  |
|-------------------------------------|--|
| Substrate Material                  | <a href="#">UV Fused Silica<sup>a</sup></a>                      |
| Diameter Tolerance (A & B)          | Outer Diameter: +0.00/-0.25 mm<br>Inner Diameter: +0.25/-0.00 mm |
| Thickness Tolerance                 | ±0.25 mm   |
| Coating Radial Angle (E)            | ±5°  |
| Spectral Range                      | 240 - 1200 nm  |
| Front ND Coating                    | Inconel (NiCrFe)   |
| Irregularity                        | <λ (per cm <sup>2</sup> )  |
| Surface Quality                     | 60-40 Scratch-Dig  |
| Parallelism                         | <3 arcmin  |
| Optical Density Tolerance           | ±5% (At Both Extremes)   |
| Linearity of Density                | ±5%  |
| R <sub>avg</sub> (AR-Coated Optics) | <0.5%  |

a. Click Link for Detailed Specifications on the Substrate



### Item Specifications

| Unmounted, Round Continuously Variable Metallic ND Filters |                          |                              |         |         |       |        |      |      |
|--|--------------------------|------------------------------|---------|---------|-------|--------|------|------|
| Item #   | Back Coating             | Optical Density <sup>a</sup> | A       | B       | C     | D      | E    | F    |
| NDC-25C-2  | Uncoated                 | 0.04 - 2.0                   | Ø25 mm  | Ø7.5 mm | Ø8 mm | Ø23 mm | 270° | 2 mm |
| NDC-25C-4  | Uncoated                 | 0.04 - 4.0                   |         |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-2  | Uncoated                 | 0.04 - 2.0                   | Ø50 mm  | Ø7.5 mm | Ø8 mm | Ø48 mm | 270° | 2 mm |
| NDC-50C-2-A  | A Coated (350 - 700 nm)  |                              |         |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-2-B  | B Coated (650 - 1050 nm) |                              |         |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-4  | Uncoated                 |                              |         |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-4-A  | A Coated (350 - 700 nm)  | 0.04 - 4.0                   |         |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-4-B  | B Coated (650 - 1050 nm) |                              |         |         |       |        |      |      |
| NDC-100C-2   | Uncoated                 | 0.04 - 2.0                   | Ø100 mm | Ø7.5 mm | Ø8 mm | Ø98 mm | 270° | 2 mm |
| NDC-100C-4   | Uncoated                 | 0.04 - 4.0                   |         |         |       |        |      |      |

| Mounted, Round Continuously Variable Metallic ND Filters |                          |                              |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
|--|--------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|--------------------------------|---------|-------|--------|------|------|
| Item #   | Back Coating             | Optical Density <sup>a</sup> | Mount Diameter | Mount Thickness | Unmounted Optic Specifications |         |       |        |      |      |
|  |                          |                              |                |                 | A                              | B       | C     | D      | E    | F    |
| NDC-25C-2M   | Uncoated                 | 0.04 - 2.0                   | 33 mm          | 4 mm            | Ø25 mm                         | Ø7.5 mm | Ø8 mm | Ø23 mm | 270° | 2 mm |
| NDC-25C-4M   | Uncoated                 | 0.04 - 4.0                   |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-2M   | Uncoated                 | 0.04 - 2.0                   | 63.5 mm        | 5 mm            | Ø50 mm                         | Ø7.5 mm | Ø8 mm | Ø48 mm | 270° | 2 mm |
| NDC-50C-2M-A   | A Coated (350 - 700 nm)  |                              |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-2M-B   | B Coated (650 - 1050 nm) |                              |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-4M   | Uncoated                 |                              |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-4M-A   | A Coated (350 - 700 nm)  | 0.04 - 4.0                   |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
| NDC-50C-4M-B   | B Coated (650 - 1050 nm) |                              |                |                 |                                |         |       |        |      |      |
| NDC-100C-2M  | Uncoated                 | 0.04 - 2.0                   | 114.3 mm       | 5 mm            | Ø100 mm                        | Ø7.5 mm | Ø8 mm | Ø98 mm | 270° | 2 mm |
| NDC-100C-4M  | Uncoated                 | 0.04 - 4.0                   |                |                 |                                |         |       |        |      |      |



- For filters with a OD range of 0.04 - 2.0,  $m = 0.00741$ .
- For filters with a OD range of 0.04 - 4.0,  $m = 0.0148$ .

This formula assumes 0° at the point where the coating begins and 270° at the end of the coating (i.e., the point of highest optical density).

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



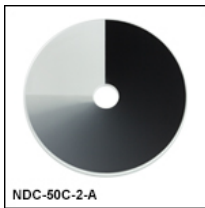
[Zoom](#)

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                |
|----|----------------------|------|---|--------------|--------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-2</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 2.0   | 311,81 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-4</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 4.0   | 311,81 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0   | 332,47 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0   | 332,47 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-100C-2</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø100 mm, OD: 0.04 - 2.0 | 396,41 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-100C-4</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø100 mm, OD: 0.04 - 4.0 | 396,41 €     | Today                    |

Add To Cart

### Unmounted Round Variable ND Filters, AR Coated



AR-Coated Back Side  
 Two AR Coating Ranges: 350 - 700 nm (-A) or 650 - 1050 nm (-B)  
 Two Optical Density Ranges: 0.04 - 2.0 or 0.04 - 4.0

These unmounted ND filters feature the same 270° metallic ND coating on the front surface as the filters above but also have an antireflection coating deposited on the back side. The AR coating, which is available for either the 350 - 700 nm or 650 - 1050 nm range, minimizes secondary reflections, making these filters an ideal choice for use in optical systems where back reflections are a concern.

If you wish to mount one of these filters onto a TR series post, that can be accomplished using the NDC-PM Post Mount Assembly shown below.

[Zoom](#)

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                 |
|----|----------------------|------|---|--------------|---------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2-A</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0, ARC: 350 - 700 nm  | 361,98 €     | Today                     |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2-B</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0, ARC: 650 - 1050 nm | 361,98 €     | Today                     |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4-A</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 350 - 700 nm  | 361,98 €     | Today                     |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4-B</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 650 - 1050 nm | 361,98 €     | <a href="#">Lead Time</a> |

Add To Cart

### Mounted Round Variable ND Filters, Uncoated



These mounted versions of our variable neutral density filters come with angular graduations and on a rotating axle. The mount has been carefully designed to minimize the effect on the clear aperture of the optic. Adapters for both 8-32 and M4 mounting holes are included with each filter, enabling compatibility with Thorlabs' [Ø1/2" TR Series Posts](#).



[Click to Enlarge](#)  
 NDC-100C-2M Neutral Density Filter Mounted on [Ø1/2" Post](#)

[Zoom](#)

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available                |
|----|----------------------|------|--|--------------|--------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-2M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 2.0 | 416,08 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-4M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 4.0 | 416,08 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0 | 438,71 €     | Today                    |



### Mounted Round Variable ND Filters, AR Coated



These mounted, AR-coated, variable neutral density filters come with angular graduations and are mounted on a rotating axle. The mount has been carefully designed to minimize the effect on the clear aperture of the optic. Adapters for both 8-32 and M4



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available                |
|----|----------------------|------|--|--------------|--------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2M-A</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0, ARC: 350 - 700 nm  | 470,19 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2M-B</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0, ARC: 650 - 1050 nm | 470,19 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4M-A</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 350 - 700 nm  | 470,19 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4M-B</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 650 - 1050 nm | 470,19 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |

Add To Cart

### Mount for Round Variable ND Filters



NDC-PM

[Zoom](#)

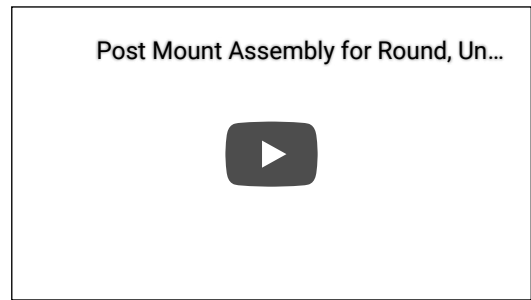
The NDC-PM Post Mount Assembly allows you to mount any of our round, unmounted, continuously variable (or [step](#)) ND filters onto a rotating axle that can be threaded onto any Thorlabs [Ø1/2" Post](#). The mount has a minimal effect on the clear aperture of the ND filter. Adapters for both 8-32 and M4 mounting holes are included with each mount.

To mount a filter, first tighten the setscrew on the side of the NDC-PM assembly using the included hex key to lock rotation. Using either a 5/64" or 2 mm hex driver, remove the silver screw, insert the filter between the two washers,

and replace the wheel and screw assembly. Take care to replace the flat metal washer and spring washer in the original order (see video to the right), and tighten the bolt. The hex bolt threads into a 0.75" long Ø6 mm rod, the rotation of which may be locked using the included 0.050" hex key. If a longer distance is needed between the post and the filter wheel, the included 0.75" long rod can be swapped for a standard [ER rod](#).



[Click to Enlarge](#)  
Continuous Filter Mounted on Post Using NDC-PM Assembly



NDC-PM Post Mount Assembly Usage

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available |
|----|----------------------|------|---|--------------|-----------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-PM</a> Post Mount Assembly for Round, Unmounted, ND Filters | 51,40 €      | Today     |

Add To Cart



[Products Home](#) / [Optical Elements](#) / [Optical Filters](#) / [Neutral Density Filters](#) / [Variable ND Filters](#) / Round Continuously Variable Metallic Neutral Density Filters



## Round Continuously Variable Metallic Neutral Density Filters

- ▶ Linear, Adjustable Attenuation by Rotation
- ▶ Optical Density Range: 0.04 - 2.0, 0.04 - 4.0
- ▶ UV Fused Silica Substrate
- ▶ Uncoated and AR-Coated Versions



**NDC-50C-2**  
Ø50 mm ND Filter  
OD: 0.04 - 2.0



**NDC-100C-4M**  
Mounted Ø100 mm ND Filter  
OD: 0.04 - 4.0



**NDC-50C-2 Variable ND Filter**  
Mounted on Ø1/2" Post  
Using an NDC-PM Mount

### Related Items

Non-Variable ND Filters



Filter Mounts



Picosecond Microchip Laser



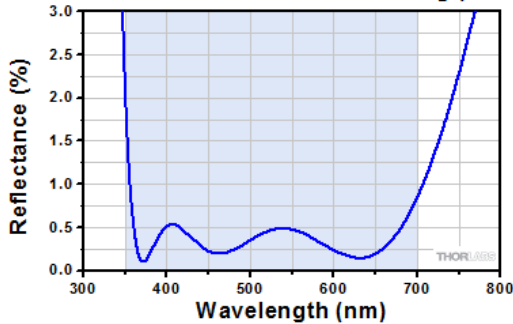
Liquid Crystal Noise Eater



[Overview](#) [Specs](#) [Graphs](#) [Damage Thresholds](#) [LIDT Calculations](#) [Smart Pack](#) [Feedback](#)

These curves illustrate the angular dependence of the AR coating that is on the back side of some of our ND filters. Please see the product groupings below for more information on the coated ND filters.

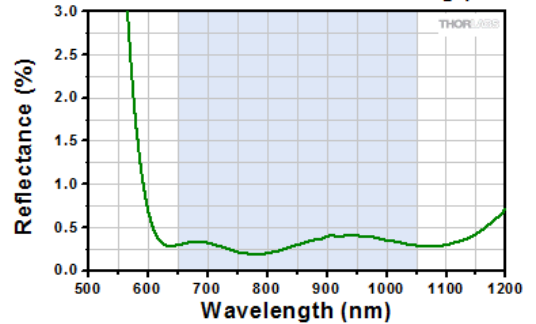
### -A Broadband Antireflection Coating (8° AOI)



[Click to Enlarge](#)  
[Click Here](#) for Raw Data

The blue shaded region indicates the specified 350 - 700 nm wavelength range for optimum performance.

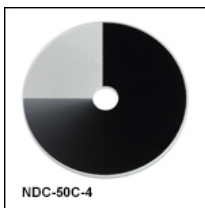
### -B Broadband Antireflection Coating (8° AOI)



[Click to Enlarge](#)  
[Click Here](#) for Raw Data

The blue shaded region indicates the specified 650 - 1050 nm wavelength range for optimum performance.

## Unmounted Round Variable ND Filters, Uncoated



**NDC-50C-4**

[Zoom](#)

These circular, continuously variable neutral density filters provide adjustable attenuation via rotation. The optical density (OD, see equations above) increases linearly from the start of the coating. The filters are coated through a full 270° arc.

If you wish to mount one of these filters onto a TR series post, that can be accomplished using the NDC-PM Post Mount Assembly shown below.

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

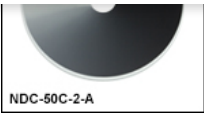
| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                |
|----|----------------------|------|---|--------------|--------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-2</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 2.0   | 311,81 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-4</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 4.0   | 311,81 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0   | 332,47 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0   | 332,47 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-100C-2</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø100 mm, OD: 0.04 - 2.0 | 396,41 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-100C-4</a> Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø100 mm, OD: 0.04 - 4.0 | 396,41 €     | Today                    |

Add To Cart



**Filters, AR Coated**





These unmounted ND filters feature the same 270° metallic ND coating on the front surface as the filters above but also have an antireflection coating deposited on the back side. The AR coating, which is available for either the 350 - 700 nm or 650 - 1050 nm range, minimizes secondary reflections, making these filters an ideal choice for use in optical systems where back reflections are a concern.

If you wish to mount one of these filters onto a TR series post, that can be accomplished using the NDC-PM Post Mount Assembly shown below.

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



**NDC-50C-4-B**

Unmounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 650 - 1050 nm

361,98 €

[Lead Time](#)

Add To Cart

### Mounted Round Variable ND Filters, Uncoated



These mounted versions of our variable neutral density filters come with angular graduations and on a rotating axle. The mount has been carefully designed to minimize the effect on the clear aperture of the optic. Adapters for both 8-32 and M4 mounting holes are included with each filter, enabling compatibility with Thorlabs' [Ø1/2" TR Series Posts](#).



[Click to Enlarge](#)  
NDC-100C-2M Neutral Density Filter Mounted on Ø1/2" Post

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available                |
|----|----------------------|------|--|--------------|--------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-2M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 2.0   | 416,08 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-25C-4M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø25 mm, OD: 0.04 - 4.0   | 416,08 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0   | 438,71 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0   | 438,71 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-100C-2M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø100 mm, OD: 0.04 - 2.0 | 606,91 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-100C-4M</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø100 mm, OD: 0.04 - 4.0 | 606,91 €     | Today                    |

Add To Cart

### Mounted Round Variable ND Filters, AR Coated



These mounted, AR-coated, variable neutral density filters come with angular graduations and are mounted on a rotating axle. The mount has been carefully designed to minimize the effect on the clear aperture of the optic. Adapters for both 8-32 and M4 mounting holes are included with each filter, enabling compatibility with Thorlabs' [Ø1/2" TR Series Posts](#).

These ND filters feature the same 270° metallic ND coating on the front surface as the filters above but also have an antireflection coating deposited on the back side. The AR coating, which is available for either the 350 - 700 nm or 650 - 1050 nm range, minimizes secondary reflections, making these filters an ideal choice for use in optical systems where back reflections are a concern.



[Click to Enlarge](#)  
NDC-50C-4M-B Neutral Density Filter Mounted on Ø1/2" Post

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available                |
|----|----------------------|------|--|--------------|--------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2M-A</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0, ARC: 350 - 700 nm  | 470,19 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-2M-B</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 2.0, ARC: 650 - 1050 nm | 470,19 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4M-A</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 350 - 700 nm  | 470,19 €     | Today                    |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">NDC-50C-4M-B</a> Mounted Continuously Variable ND Filter, Ø50 mm, OD: 0.04 - 4.0, ARC: 650 - 1050 nm | 470,19 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |

Add To Cart

### Mount for Round Variable ND Filters



Assembly allows you to mount any of our r...  
s [Ø1/2" Post](#). The mount has a minimal ef...





|   |   |   |
|---|---|---|
|  <p>NDC-PM</p> | <p>and replace the wheel and screw assembly. Take care to replace the flat metal washer and spring washer in the original order (see video to the right), and tighten the bolt. The hex bolt threads into a 0.75" long Ø6 mm rod, the rotation of which may be locked using the included 0.050" hex key. If a larger distance is needed between</p> |  |
|---|---|---|

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

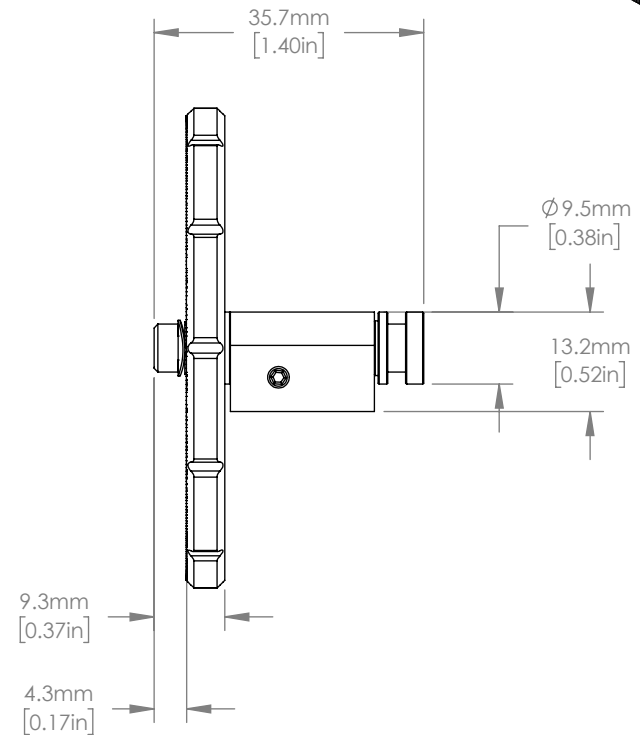
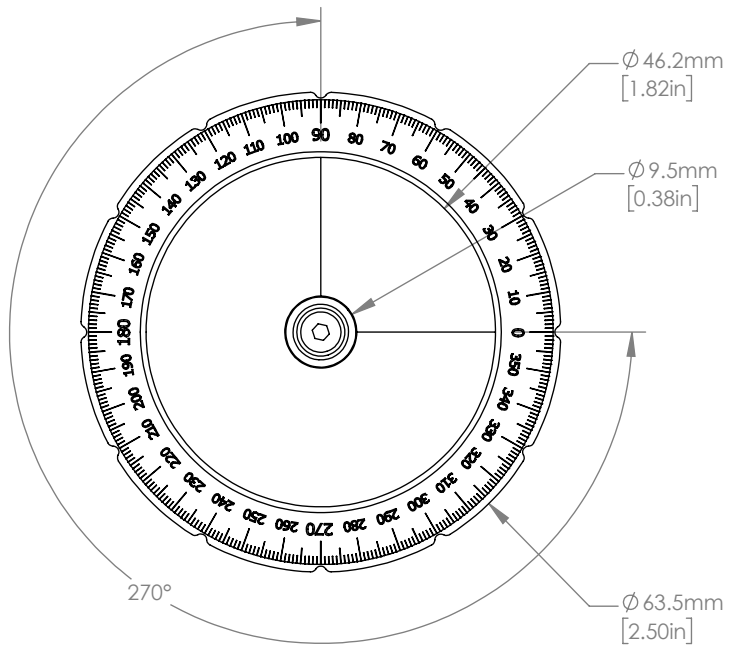
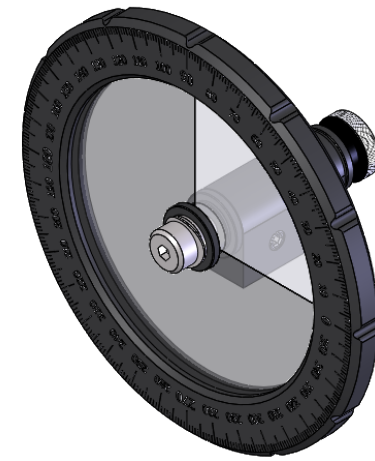
[Privacy Policy](#)

 **English** ^

€ **EUR** ^

[Add to Cart](#)





NOTES/SPECIFICATIONS:

1. SPECTRAL RANGE: 240-1200nm
2. CLEAR APERTURE: AREA >9.5mm ID AND <45.5mm OD
3. SURFACE FLATNESS:  $<\lambda/cm^2$
4. SURFACE QUALITY: 60-40 SCRATCH-DIG
5. PARALLELISM:  $<3$  arcmin
6. COATED MATERIAL: INCONEL
7. COATED RADIAL ANGLE:  $270 \pm 5^\circ$
8. OPTICAL DENSITY: 0.04 TO 2.0
9. OPTICAL DENSITY TOLERANCE:  $\pm 5\%$

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

|   |      |  |  |               |
|---|------|--|--|---------------|
| DRAWING PROJECTION  |      |  | <br><a href="http://www.thorlabs.com">www.thorlabs.com</a> |               |
| NAME  | DATE | MOUNTED CONTINUOUSLY VARIABLE NEUTRAL DENSITY FILTER |  |               |
| DRAWN   | JAC  | 04/MAR/19  | REV E  |               |
| APPROVAL  | BW   | 04/MAR/19  | MATERIAL   |               |
| COPYRIGHT © 2019 BY THORLABS<br>VALUES IN PARENTHESIS ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND OFF ERRORS |      |  | UV FUSED SILICA/ ALUMINUM                                  |               |
|   |      |  | ITEM #   | APPROX WEIGHT |
|   |      |  | NDC-50C-2M   | 30.0 g        |



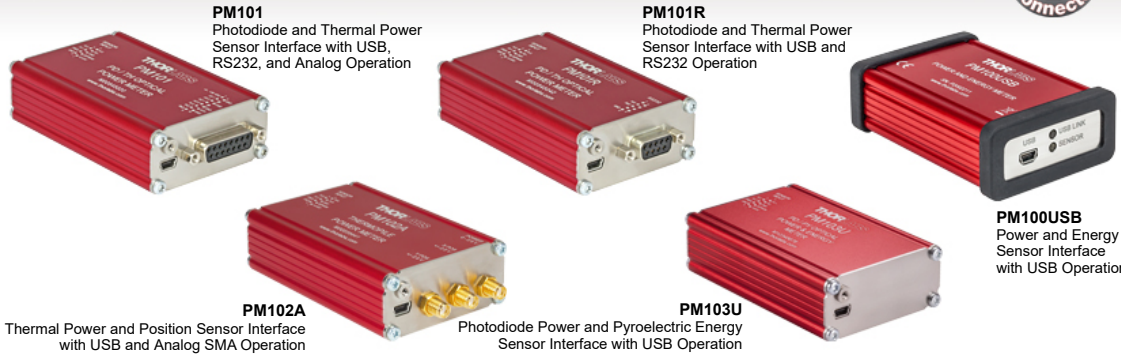
[Home](#) / [Optical Power and Energy Meters](#) / Power and Energy Meter Interfaces with External Readout



## Power and Energy Meter Interfaces with External Readout

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

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



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

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

**PM100USB**  
Power and Energy Sensor Interface with USB Operation

**PM102A**

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

**PM103U**

Photodiode Power and Pyroelectric Energy Sensor Interface with USB Operation

### Related Items



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

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



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

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



| Model    | Dimensions (mm)  | Temp. Range (°C) | Weight (kg)  | Power             | Control   | Software                                  | Frequency (Hz) | Calibration | Accessories                        |
|----------|--|------------------|--------------|-------------------|---|---|----------------|-------------|------------------------------------|
| PM101K   | (3.78" x 2.25" x 1.00")  |                  |              |                   |   |   |                |             |                                    |
| PM101U   | 93.6 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.68" x 2.25" x 1.00")  |                  |              |                   | External PC;<br>Windows® Application<br>or Driver Set | Windows® Application<br>Software Provided | 1000 Hz        | No          | USB Cable<br>Provided <sup>a</sup> |
| PM102    | 96.5 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.80" x 2.25" x 1.00")  | 0 to 40 °C       | -40 to 70 °C | 0.16 kg (0.35 lb) |   |   |                |             |                                    |
| PM102A   | 100.0 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.94" x 2.25" x 1.00") |                  |              |                   |   |   |                |             |                                    |
| PM102U   | 93.6 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.68" x 2.25" x 1.00")  |                  |              |                   |   |   |                |             |                                    |
| PM103    | 96.5 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.80" x 2.25" x 1.00")  |                  |              |                   | External PC;<br>Windows® Application<br>or Driver Set | Windows® Application<br>Software Provided | 1000 Hz        | No          | USB Cable<br>Provided <sup>a</sup> |
| PM103A   | 100.2 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.94" x 2.25" x 1.00") | 0 to 40 °C       | -40 to 70 °C | 0.15 kg (0.33 lb) |   |   |                |             |                                    |
| PM103U   | 93.6 x 57.2 x 25.4 mm <sup>3</sup><br>(3.68" x 2.25" x 1.00")  |                  |              |                   |   |   |                |             |                                    |
| PM100USB | 93.1 x 60.4 x 28.7 mm <sup>3</sup><br>(3.67" x 2.38" x 1.13")  | 0 to 40 °C       | -40 to 70 °C | 0.15 kg (0.33 lb) |   |   | 300 Hz         |             |                                    |

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

### Compatible Sensor Overview

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

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

## Power Meter Interfaces for Photodiode and Thermal Power Sensors



Compatible with Over 25 Photodiode and Thermal Power Sensors  
All Models Feature USB 2.0 Operation  
Select Models with:

- UART or RS232 Operation
- Analog Output

Power Supply via USB (All Models) or DA-15 Connector (PM101 Only)  
Includes Certificate of Calibration

[Zoom](#)

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

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

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

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

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

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

| +1 Qty               | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available |
|----------------------|------|--|--------------|-----------|
| <input type="text"/> |      | <a href="#">PM101</a> Customer Inspired! Power Meter Interface with USB, RS232, UART, and Analog Operation | 440,05 €     | Today     |
| <input type="text"/> |      | <a href="#">PM101A</a> Power Meter Interface with USB and Analog Operation                                 | 430,68 €     | Today     |



### Power Meter Interfaces for Thermal Power and Thermal Position Sensors



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

#### Power Meter Interface Quick Comparison<sup>a</sup>

| Item # | PM103 | PM103A | PM103U |
|--------|-------|--------|--------|
|--------|-------|--------|--------|

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)

English ^

EUR ^

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

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

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

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

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

Add To Cart

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



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

#### Power Meter Interface Quick Comparison<sup>a</sup>

| Item #                   | PM103                   | PM103A         | PM103U   |
|--------------------------|-------------------------|----------------|----------|
| Photo (Click to Enlarge) |                         |                |          |
| Connectors               | Mini USB & DA-15        | Mini USB & SMA | Mini USB |
| Control / Digital Output | USB 2.0, RS232, or UART | USB 2.0        | USB 2.0  |
| Analog Output            | Yes                     | Yes            | No       |

Zoom

The PM103 Series Interfaces are compatible with all our C-Series photodiode power and pyroelectric energy sensors. Our [standard photodiode](#), [slim photodiode](#), [integrating sphere](#), and [fiber](#) sensors can collectively measure optical powers from 100 pW to 20 W. Alternatively, unamplified anode- or cathode-grounded photodiodes with currents up to 10 mA can be used. Our [pyroelectric energy](#) sensors can measure energies from 10 μJ to 15 J. Other energy sensors with voltage outputs from 20 mV to 200 V can also be used. While all of the interfaces can be operated and powered with a PC via the mini-USB port, select interfaces have additional features such as UART or RS232 operation and analog output (see the table to the right). Models with analog output can be operated autonomously when connected to a power supply, without the need for an additional control device. All of the interfaces include reset buttons, allowing the systems to be easily rebooted.

<sup>a</sup> See the *Feature Comparison* tab for a full comparison.

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

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

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

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

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

Add To Cart

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

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





lements with a maximum output voltage of 1 V can be used. Our [pyroelectric energy](#) sensors can measure energies from 10  $\mu$ J to 15 J, as well as other energy sensors with voltage outputs from 100 mV to 100 V. This interface can be operated and powered by a PC via the mini-USB port. A readout rate of 300 samples per second allows active signal monitoring while the interface is in use.

Please note that sensors are not included with the PM100USB. For information about our compatible sensors, please see the sensor descriptions below. Thorlabs offers a recalibration service for the PM100ISR, which can

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



### Standard Photodiode Power Sensors

- For General Purpose Optical Power Measurements
- Integrated Viewing Target for Easy Sensor Alignment
- $\varnothing$ 9.5 mm Sensor Aperture
- Sensor, Protective Cap, IR Target, and Thread Adapter Included
- Fiber Adapters Available Separately (See Table Below)
- See the [Full Web Presentation](#) for More Information



[Click to Enlarge](#)  
S120C and CP44F Quick-Release Mount

These Standard Photodiode Power Sensors are ideal for metering low power coherent and incoherent sources from the UV to the NIR. Each NIST-Traceable, calibrated sensor features an integrated viewing target for easy alignment, enhanced shielding against electromagnetic interference, an over-temperature-alert device, and a large  $\varnothing$ 9.5 mm sensor aperture. The sensors are compatible with [30 mm cage systems](#),  [\$\varnothing\$ 1/2" posts](#), and [SM1 \(1.035"-40\) lens tubes](#), and are ideal for free-space and fiber-coupled sources.

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

| Item # <sup>a</sup>                          | S120VC  | S120C  | S121C                            | S122C <sup>h</sup>           |
|--|---|--|----------------------------------|------------------------------|
| Sensor Image<br>(Click the Image to Enlarge) |   |  |                                  |                              |
| Aperture Size                                | $\varnothing$ 9.5 mm  |  |                                  |                              |
| Wavelength Range                             | 200 - 1100 nm   | 400 - 1100 nm  | 400 - 1100 nm                    | 700 - 1800 nm                |
| Power Range                                  | 50 nW - 50 mW   |  | 500 nW - 500 mW                  | 50 nW - 40 mW                |
| Detector Type                                | Si Photodiode (UV Extended)   | Si Photodiode  |                                  | Ge Photodiode                |
| Linearity                                    | $\pm$ 0.5%  |  |                                  |                              |
| Resolution <sup>b</sup>                      | 1 nW  |  | 10 nW                            | 2 nW                         |
| Measurement Uncertainty <sup>c</sup>         | $\pm$ 3% (440 - 980 nm)<br>$\pm$ 5% (280 - 439 nm)<br>$\pm$ 7% (200 - 279 nm, 981 - 1100 nm)  | $\pm$ 3% (440 - 980 nm)<br>$\pm$ 5% (400 - 439 nm)<br>$\pm$ 7% (981 - 1100 nm) |                                  | $\pm$ 5%                     |
| Responsivity <sup>d</sup> (Click for Plot)   | <br><a href="#">Raw Data</a>  | <br><a href="#">Raw Data</a>   | <br><a href="#">Raw Data</a>     | <br><a href="#">Raw Data</a> |
| Coating/Diffuser                             | Reflective ND (OD1.5) <sup>e</sup>  | Reflective ND (OD1) <sup>f</sup>   | Reflective ND (OD2) <sup>g</sup> | Absorptive ND (Schott NG9)   |
| Head Temperature Measurement                 | NTC Thermistor 4.7 k $\Omega$   |  |                                  |                              |
| Housing Dimensions                           | $\varnothing$ 30.5 mm x 12.7 mm   |  |                                  |                              |
| Cable Length                                 | 1.5 m   |  |                                  |                              |
| Post Mounting <sup>e,f,g</sup>               | Universal 8-32 / M4 Tap, Post Not Included  |  |                                  |                              |
| Aperture Thread                              | External SM1 (1.035"-40)  |  |                                  |                              |
| Compatible Fiber Adapters                    | <a href="#">S120-FC</a> , <a href="#">S120-APC</a> , <a href="#">S120-SMA</a> , <a href="#">S120-ST</a> , <a href="#">S120-LC</a> , and <a href="#">S120-SC</a> (Not Included)                            |  |                                  |                              |
| Compatible Consoles                          | <a href="#">PM400</a> , <a href="#">PM100D</a> , <a href="#">PM100A</a> , and <a href="#">PM320E</a>  |  |                                  |                              |
| Compatible Interfaces                        | <a href="#">PM101</a> , <a href="#">PM101A</a> , <a href="#">PM101R</a> , <a href="#">PM101U</a> , <a href="#">PM103</a> , <a href="#">PM103A</a> , <a href="#">PM103U</a> , and <a href="#">PM100USB</a> |  |                                  |                              |

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

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

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



### Slim Photodiode Power Sensors

For Optical Power Measurements in Confined Spaces  
Very Slim Design: 5 mm Thin on Sensor Side



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



A separately available SM1A29 adapter can be attached by 2 setscrews to any S130 series power sensor to mount fiber adapters, light shields, filters or any other SM1-threaded (1.035"-40) mechanics or optics. The FBSM Mount allows our S130 series power sensors to be mounted vertically into [FiberBench systems](#) for stable mounting with a minimal footprint.

Thorlabs offers a recalibration service for these photodiode power sensors, which can be ordered below (see Item # CAL-ULVPD2 for UV-extended Si sensors, Item # CAL-PD2 for Si sensors, and Item # CAL-IRPD2 for Ge sensors).

| Item # <sup>a</sup>                          | S130VC   | S130C   | S132C                                       |
|--|--|---|---|
| Sensor Image<br>(Click the Image to Enlarge) |  |   |   |
| Aperture Size                                | Ø9.5 mm  |   |   |
| Wavelength Range                             | 200 - 1100 nm  | 400 - 1100 nm   | 700 - 1800 nm <sup>b</sup>                  |
| Power Range<br>(with Filter)                 | 500 pW - 0.5 mW <sup>c</sup><br>(Up to 50 mW) <sup>c</sup>   | 500 pW - 5 mW<br>(Up to 500 mW)                                 | 5 nW - 5 mW<br>(Up to 500 mW)               |
| Detector Type                                | Si Photodiode (UV Extended)  | Si Photodiode   | Ge Photodiode                               |
| Linearity                                    | ±0.5%  |   |   |
| Resolution                                   | 100 pW <sup>d</sup>  |   |   |
| Measurement Uncertainty <sup>f</sup>         | ±3% (440 - 980 nm)<br>±5% (280 - 439 nm)<br>±7% (200 - 279 nm, 981 - 1100 nm)  | ±3% (440 - 980 nm)<br>±5% (400 - 439 nm)<br>±7% (981 - 1100 nm) | ±5%   |
| Responsivity <sup>g</sup> (Click for Plot)   | <br><a href="#">Raw Data</a>   | <br><a href="#">Raw Data</a>                                    | <br><a href="#">Raw Data</a>                |
| Coating/Diffuser                             | Reflective ND (OD1.5) <sup>c</sup>   | Reflective ND (OD2) <sup>h</sup>                                | Absorptive ND (Schott NG9/KG3) <sup>b</sup> |
| Housing Dimensions                           | 150 mm x 19 mm x 10 mm; 5 mm Thickness on Sensor Side  |   |   |
| Cable Length                                 | 1.5 m  |   |   |
| Post Mounting                                | 8-32 and M4 Taps   |   |   |
| Adapters (Not Included)                      | SM1A29: Add SM1 Thread and Viewing Target to Aperture<br>Fiber Adapters Compatible with SM1A29 Adapter: <a href="#">S120-FC</a> , <a href="#">S120-APC</a> , <a href="#">S120-SMA</a> , <a href="#">S120-ST</a> , <a href="#">S120-LC</a> , and <a href="#">S120-SC</a><br>FBSM: Integrate Sensor into FiberBench Setups |   |   |
| Compatible Consoles                          | <a href="#">PM400</a> , <a href="#">PM100D</a> , <a href="#">PM100USB</a> , <a href="#">PM100A</a> , and <a href="#">PM320E</a>  |   |   |
| Compatible Interfaces                        | <a href="#">PM101</a> , <a href="#">PM101A</a> , <a href="#">PM101R</a> , <a href="#">PM101U</a> , <a href="#">PM103</a> , <a href="#">PM103A</a> , <a href="#">PM103U</a> , and <a href="#">PM100USB</a>  |   |   |

- a. For complete specifications, please see the Specs tab [here](#).
- b. For the S132C, these specifications are valid for devices with serial numbers 1203xxx or higher. Older versions had a reflective ND diffuser (OD1), which would decrease the wavelength range from 700 nm to 1800 nm to 1200 nm to 1800 nm. For additional information, please contact [technical support](#).
- c. For the S130VC, these specifications are valid for devices with serial numbers 1203xxx or higher. Older versions had an optical power range of 5 nW to 5 mW (50 nW to 50 mW with filter) and a reflective ND diffuser (OD1). For additional information, please contact [technical support](#).
- d. Measured with PM100D console in low bandwidth setting, without filter.
- e. Measured with PM100D console in low bandwidth setting at 1550 nm, without filter.
- f. Beam Diameter > 1 mm.
- g. All sensor responsivities are calibrated to a NIST-traceable source with measurements taken in 5 nm intervals.
- h. For the S130C, these specifications are valid for devices with serial numbers 1203xxx or higher. Older versions had an absorptive ND diffuser (Schott NG9). For additional information, please contact [technical support](#).

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

| +1 | Qty                  | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                 |
|----|----------------------|------|---|--------------|---------------------------|
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">S130VC</a> Slim Photodiode Power Sensor, UV-Extended Si, 200 - 1100 nm, 50 mW       | 594,12 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">S130C</a> Slim Photodiode Power Sensor, Si, 400 - 1100 nm, 500 mW                   | 490,84 €     | <a href="#">5-8 Days</a>  |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">S132C</a> Slim Photodiode Power Sensor, Ge, 700 - 1800 nm, 500 mW                   | 697,41 €     | Today                     |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">SM1A29</a> <b>Customer Inspired!</b> SM1 Thread Adapter for Slim Photodiode Sensors | 40,58 €      | Today                     |
|    | <input type="text"/> |      | <a href="#">FBSM</a> FiberBench Mount for Slim Photodiode Sensors                               | 40,32 €      | Today                     |

Add To Cart

### Microscope Slide Photodiode Power Sensor

Wavelength Range: 350 nm to 1100 nm  
Sensitive to Optical Powers from 10 nW to 150 mW  
Designed to Measure Optical Power at the Sample Plane of a Microscope

|                     |       |
|---------------------|-------|
| Item # <sup>a</sup> | S170C |
|---------------------|-------|



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

Sensor Image  
(Click Image to Enlarge)



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy



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

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

|  |   |
|--|---|
| Resolution <sup>a</sup>                    | 1 nmV   |
| Calibration Uncertainty <sup>c</sup>       | ±3% (440 - 980 nm)<br>±5% (350 - 439 nm)<br>±7% (981 - 1100 nm)   |
| Responsivity <sup>d</sup> (Click for Plot) | <br><a href="#">Raw Data</a>  |
| Neutral Density Filter                     | Reflective (OD 1.5)   |
| Cable Length                               | 1.5 m   |
| Post Mounting                              | Universal 8-32 / M4 Tap, Post Not Included  |
| Compatible Consoles                        | <a href="#">PM400</a> , <a href="#">PM100D</a> , <a href="#">PM100A</a> , and <a href="#">PM320E</a>  |
| Compatible Interfaces                      | <a href="#">PM101</a> , <a href="#">PM101A</a> , <a href="#">PM101R</a> , <a href="#">PM101U</a> , <a href="#">PM103</a> , <a href="#">PM103A</a> , <a href="#">PM103U</a> , and <a href="#">PM100USB</a> |

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

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

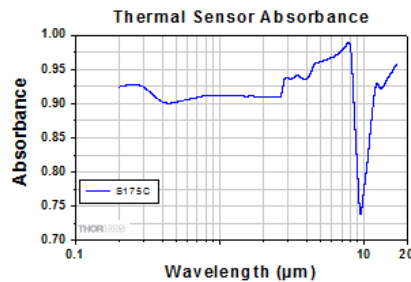
|  |      |   |              |                           |
|--|------|---|--------------|---------------------------|
| +1 Qty                                     | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                 |
| <input type="text" value="1"/>             |      | <a href="#">S170C</a> Customer Inspired! Microscope Slide Power Sensor, 350 - 1100 nm, 150 mW | 1,096.76 €   | <a href="#">Lead Time</a> |
| <input type="button" value="Add To Cart"/> |      |   |              |                           |

### Microscope Slide Thermal Power Sensor

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

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

 See the [Full Web Presentation](#) for More Information



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



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

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

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

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

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

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

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

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





## Integrating Sphere Photodiode Power Sensors

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



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

[Separately](#)

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

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

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

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

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

b. Measured with PM100D console in low bandwidth setting.

c. Beam diameter > 1 mm

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

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

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

Add To Cart

## Fiber Photodiode Power Sensors



See the [Full Web Presentation](#) for More Information

The S15xC Compact Fiber Photodiode Power Sensor is designed to take power measurements from a wide variety of fiber coupled sources. The compact sensor, integrated into the power meter connector, features a unique integrated design housing the photodiode sensor, fiber coupling, and NIST-traceable data. Standard FC (and SMA - S150C and S151C) connectors are easily interchanged with a variety of standard fiber connectors.



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



|   | FC <sup>b</sup> & SMA   |   | FC <sup>b</sup>  |                                       |
|---|---|---|--|---------------------------------------|
| <b>Included Connectors</b>                          | FC <sup>b</sup> & SMA   |   | FC <sup>b</sup>  |                                       |
| <b>Wavelength Range</b>                             | 350 - 1100 nm   | 400 - 1100 nm   | 800 - 1700 nm  |                                       |
| <b>Power Range</b>                                  | 100 pW to 5 mW<br>(-70 dBm to +7 dBm)   | 1 nW to 20 mW<br>(-60 dBm to +13 dBm)                           | 100 pW to 3 mW<br>(-70 dBm to +5 dBm)  | 1 nW to 20 mW<br>(-60 dBm to +13 dBm) |
| <b>Detector Type</b>                                | Si Photodiode   |   | InGaAs Photodiode  |                                       |
| <b>Linearity</b>                                    | ±0.5%   |   |  |                                       |
| <b>Resolution<sup>c</sup></b>                       | 10 pW (-80 dBm)   | 100 pW (-70 dBm)  | 10 pW (-80 dBm)  | 100 pW (-70 dBm)                      |
| <b>Measurement Uncertainty<sup>d</sup></b>          | ±3% (440 - 980 nm)<br>±5% (350 - 439 nm)<br>±7% (981 - 1100 nm)   | ±3% (440 - 980 nm)<br>±5% (400 - 439 nm)<br>±7% (981 - 1100 nm) | ±5%  |                                       |
| <b>Responsivity<sup>f</sup> (Click for Details)</b> | <a href="#">Raw Data</a>  | <a href="#">Raw Data</a>  | <a href="#">Raw Data</a>   | <a href="#">Raw Data</a>              |
| <b>Coating/Diffuser</b>                             | N/A   | Absorptive ND (Schott NG3)                                      | N/A  |                                       |
| <b>Head Temperature Measurement<sup>e</sup></b>     | NTC Thermistor 3 kΩ   |   |  |                                       |
| <b>Aperture Thread</b>                              | External SM05 (0.535"-40)   |   |  |                                       |
| <b>Fiber Adapters</b>                               | Included: <a href="#">PM20-FC</a> and <a href="#">PM20-SMA</a><br>Optional: <a href="#">PM20-APC</a> , <a href="#">PM20-LC</a> , <a href="#">PM20-SC</a> , and <a href="#">PM20-ST</a>                    |   | Included: <a href="#">PM20-FC</a><br>Optional: <a href="#">PM20-APC</a> , <a href="#">PM20-LC</a> , <a href="#">PM20-SC</a> , <a href="#">PM20-ST</a> , and <a href="#">PM20-SMA</a> |                                       |
| <b>Compatible Consoles</b>                          | <a href="#">PM400</a> , <a href="#">PM100D</a> , <a href="#">PM100A</a> , and <a href="#">PM320E</a>  |   |  |                                       |
| <b>Compatible Interfaces</b>                        | <a href="#">PM101</a> , <a href="#">PM101A</a> , <a href="#">PM101R</a> , <a href="#">PM101U</a> , <a href="#">PM103</a> , <a href="#">PM103A</a> , <a href="#">PM103U</a> , and <a href="#">PM100USB</a> |   |  |                                       |

- a. For complete specifications, please see the Specs tab [here](#).
- b. Because of the large active detector area of these sensors, the included PM20-FC fiber adapter can be used with both FC/PC- and FC/APC-terminated fiber.
- c. Measured with PM100D console in low bandwidth setting.
- d. For a beam diameter > 1 mm incident on the active area of the detector (i.e. at the detector surface after the light has exited the fiber and passed through any internal optics).
- e. This specification is valid for devices with serial numbers 1203xxx and higher. For older versions, please contact [technical support](#).
- f. All sensor responsivities are calibrated to a NIST-traceable source with measurements taken in 5 nm intervals.

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

| +1 Qty | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                |
|--------|------|---|--------------|--------------------------|
|        |      | <a href="#">S150C</a> Compact Fiber Photodiode Power Sensor, Si, 350 - 1100 nm, 5 mW      | 295,10 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|        |      | <a href="#">S151C</a> Compact Fiber Photodiode Power Sensor, Si, 400 - 1100 nm, 20 mW     | 336,41 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |
|        |      | <a href="#">S154C</a> Compact Fiber Photodiode Power Sensor, InGaAs, 800 - 1700 nm, 3 mW  | 423,95 €     | Today                    |
|        |      | <a href="#">S155C</a> Compact Fiber Photodiode Power Sensor, InGaAs, 800 - 1700 nm, 20 mW | 485,92 €     | <a href="#">5-8 Days</a> |

Add To Cart

### High-Resolution Thermal Power Sensors

| Item # <sup>a</sup>                              | S401C  | S405C                                 |
|--|--|---------------------------------------|
| <b>Sensor Image (Click the Image to Enlarge)</b> |  |                                       |
| <b>Wavelength Range</b>                          | 190 nm - 20 μm   | 190 nm - 20 μm                        |
| <b>Optical Power Range</b>                       | 10 μW - 1 W (3 W <sup>b</sup> )                                    | 100 μW - 5 W                          |
| <b>Input Aperture Size</b>                       | Ø10 mm   | Ø10 mm                                |
| <b>Active Detector Area</b>                      | 10 mm x 10 mm  | 10 mm x 10 mm                         |
| <b>Max Optical Power Density</b>                 | 500 W/cm <sup>2</sup> (Avg.)                                       | 1.5 kW/cm <sup>2</sup> (Avg.)         |
| <b>Detector Type</b>                             | Thermal Surface Absorber (Thermopile) with Background Compensation | Thermal Surface Absorber (Thermopile) |
| <b>Linearity</b>                                 | ±0.5%  | ±0.5%                                 |
| <b>Resolution<sup>c</sup></b>                    | 1 μW   | 5 μW                                  |
|  | +3% @ 1064 nm  | +3% @ 1064 nm                         |

High Resolution of 1 μW or 5 μW  
 S401C and S405C Have Thermistors Used to Monitor Temperature of Sensor Head  
 S401C: Background Compensation for Low-Drift Measurements  
 S405C: Accommodates Average Optical Power Densities up to 1.5 kW/cm<sup>2</sup>  
 See the [Full Web Presentation](#) for More Information

Thorlabs offers two broadband thermal power sensors designed to measure low optical power sources with high resolution. Each thermal sensor's broadband coating has a flat spectral response over a wide wavelength range, as shown in the plot below.

An aperture size of Ø10 mm allows for easy alignment and measurement of large-spot-size laser sources. For easy integration with Thorlabs' [lens tube systems](#) and SM1-threaded (1.035"-40) fiber adapters, each sensor has either external SM1 threading or includes an externally SM1-threaded adapter.

The S401C uses active thermal background compensation to provide low-drift power measurements. This is implemented through the use of two similar sensor circuits. One sensor circuit is the type all thermal power sensors share: it measures heat flow from light absorber to heat sink. The other sensor circuit monitors the ambient temperature. It is located within the housing and measures heat flow from heat sink towards the absorber. The measurements of the two sensor circuits are subtracted, which minimizes the effect of thermal drift on the laser power measurement. (For information about how the



[Click to Enlarge](#)  
 S401C Thermal Sensor with Included Light Shield



|                                     |  |  |
|-------------------------------------|--|--|
| Temperature Sensor (In Sensor Head) | NTC Thermistor                               | NTC Thermistor                               |
| Cable Length                        | 1.5 m  |  |
| Post Mounting                       | Universal 8-32 / M4 Taps (Post Not Included) | Universal 8-32 / M4 Taps (Post Not Included) |

SM1 lens tubes), and it can also connect directly to Thorlabs' [30 mm Cage Systems](#).

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

### Thermal Sensor Absorbance

1.00

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



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

[Click to Enlarge](#)

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

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

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

Add To Cart

## Thermal Sensors for Max Powers of 10 W

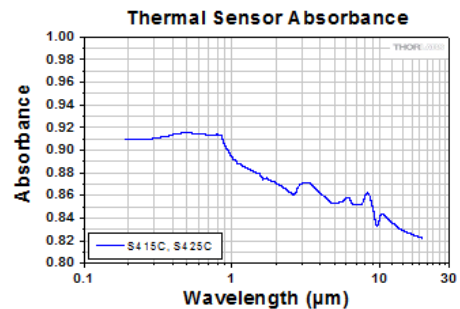
| Item # <sup>a</sup>                   | S415C   | S425C   |
|---------------------------------------|---|---|
| Sensor Image (Click Image to Enlarge) |   |   |
| Wavelength Range                      | 190 nm - 20 μm  | 190 nm - 20 μm                                      |
| Optical Power Range   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

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

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

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

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



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

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





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

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

+1 Qty Docs Part Number - Universal Price ex VAT Available

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy

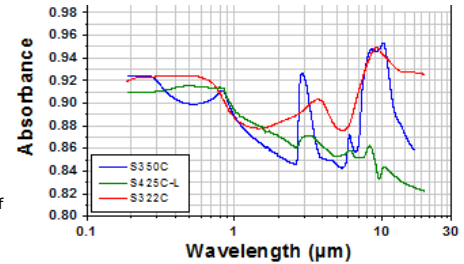


- S350C has 40 mm Aperture well suited to External and Other Lasers with Large Spot Sizes
- S425C-L Features Removable Heat Sink
- S322C is Fan Cooled with an Optical Power Range up to 200 W
- See the [Full Web Presentation](#) for More Information

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

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

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



[Click to Enlarge](#)

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

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

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

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

+1 Qty Docs Part Number - Universal Price ex VAT Available

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



## Thermal Sensors for High Max Power Density Laser Pulses

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)

English ^

EUR ^

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

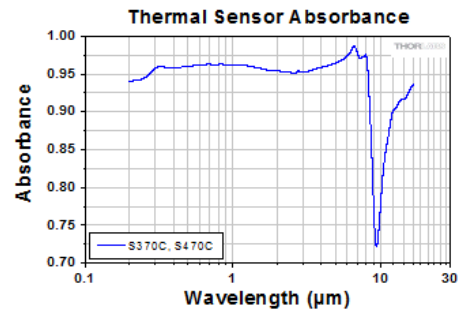
- a. For complete specifications, please see the [Specs](#) tab [here](#).
- b. Two Minute Maximum Exposure Time
- c. Measurement taken with the PM100D console for the S370C and with the legacy PM200 for the S470C. In all cases, the acceleration circuit was switched off. Resolution performance will be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

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

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

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

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



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

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

| +1 Qty               | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available                |
|----------------------|------|--|--------------|--------------------------|
| <input type="text"/> |      | <a href="#">S370C</a> Thermal Power Sensor Head, Volume Absorber, 0.4 - 5.2 μm, 10 W, Ø25 mm         | 1,096.76 €   | <a href="#">5-8 Days</a> |
| <input type="text"/> |      | <a href="#">S470C</a> Thermal Power Sensor Head, Volume Absorber, 0.25 - 10.6 μm, 0.1mW - 5W, Ø15 mm | 1,116.43 €   | Today                    |

## Thermal Position & Power Sensors

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

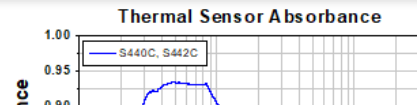
Segmented Quadrant Position-Sensing Detector  
 S440C: High Sensitivity; 30 mm Cage System Compatible  
 S442C: High Power; Heat Sink Included  
 See the [Full Web Presentation](#) for More Information

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

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

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

|                                     |   |  |
|-------------------------------------|---|--|
| Position Accuracy <sup>d</sup>      | 50 µm (Ø1 mm Circle)<br>200 µm (Ø6 mm Circle) | 100 µm (Ø1 mm Circle)<br>300 µm (Ø6 mm Circle) |
| Position Repeatability <sup>d</sup> | 15 µm (Ø1 mm Circle)<br>100 µm (Ø6 mm Circle) | 25 µm (Ø1 mm Circle)<br>150 µm (Ø6 mm Circle)  |



Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



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

Capable of operating at up to 20 µm.

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

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

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

### Pyroelectric Energy Sensors

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



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

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

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

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

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

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

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

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



### Recalibration Service for Photodiode Power Sensors

Thorlabs offers recalibration services for our photodiode optical power sensors. To ensure accurate measurements, we recommend recalibrating the sensors annually. Recalibration of a single channel power and/or energy meter console or interface is

| Calibration Service Item # | Compatible Sensors |
|----------------------------|--------------------|
| CAL-UVPD                   | S120VC             |

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

Careers

Site Index

Privacy Policy



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

| +1  | Qty                  | Docs | Part Number - Universal  | Price ex VAT | Available                 |
|-----|----------------------|------|--|--------------|---------------------------|
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-UVPD</a><br>Recalibration Service for S120VC UV-Extended Silicon Photodiode Power Sensor<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/>              | 159,98 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-PD</a><br>Recalibration Service for Single-Power-Range Silicon Photodiode Power Sensors<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/>               | 138,69 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-UVPD2</a><br>Recalibration Service for S130VC Extended-UV Silicon Photodiode Power Sensor<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/>             | 189,98 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-PD2</a><br>Recalibration Service for Dual-Power-Range Silicon Photodiode Power Sensors<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/>                | 161,32 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-IRPD</a><br>Recalibration Service for Single-Power-Range Germanium or InGaAs Photodiode Power Sensors<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/> | 156,40 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-IRPD2</a><br>Recalibration Service for Dual-Power-Range Germanium or InGaAs Photodiode Power Sensors<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/>  | 171,15 €     | <a href="#">Lead Time</a> |
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-MIRPD</a><br>Recalibration Service for Extended InGaAs or MCT Photodiode Power Sensors<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/>                | 279,35 €     | <a href="#">Lead Time</a> |

### Recalibration Service for Thermal Power and Pyroelectric Energy Sensors

Thorlabs offers recalibration services for our Thermal Power and Pyroelectric Energy Sensors. To ensure accurate measurements, we recommend recalibrating the sensors annually. Recalibration of a single-channel power and/or energy meter console or interface is included with the recalibration of a sensor at no additional cost. If you would like to have the PM320E Dual-Channel Power and Energy Meter Console calibrated with a sensor or sensors, please contact [Tech Support](#) for ordering information.

| Sensor Type         | Sensor Item #s  |
|---------------------|---|
| Thermal Power       | S175C, S302C <sup>a</sup> , S305C <sup>a</sup> , S310C <sup>a</sup> , S314C <sup>a</sup> , S322C, S350C, S370C, S401C, S405C, S415C, S425C, S425C-L, S470C, PM160T, PM160T-HP, PM16-401, PM16-405 |
| Pyroelectric Energy | ES111C, ES120C, ES145C, ES220C, ES245C  |

Please note that the CAL-THPY recalibration service cannot be used for our [Thermal Position & Power Sensors](#); recalibration for these sensors can be requested by contacting [Tech Support](#).

a. This former catalog item is now offered as a special.

The table to the upper right lists the sensors for which the CAL-THPY recalibration service is available. Please enter the Part # and Serial # of the sensor that requires recalibration prior to selecting Add to Cart.

**Please Note:** To ensure your item being returned for calibration is routed appropriately once it arrives at our facility, please do not ship it prior to being provided an RMA Number and return instructions by a member of our team. Pyroelectric energy sensors returned for recalibration or servicing must include the separate BNC to DB9 adapter, which contains the sensor EEPROM.

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

| +1  | Qty                  | Docs | Part Number - Universal   | Price ex VAT | Available                 |
|-----|----------------------|------|---|--------------|---------------------------|
| N/A | <input type="text"/> |      | <a href="#">CAL-THPY</a><br>Recalibration Service for Thermal Power and Pyroelectric Energy Sensors at 1064 nm<br>Part Number: <input type="text"/> Serial Number: <input type="text"/> | 176,06 €     | <a href="#">Lead Time</a> |

### Recalibration of Single-Channel Power & Energy Meter Electronics

This recalibration service is for the power and/or energy meter electronics of our single-channel consoles and interfaces. To ensure accurate measurements, we recommend recalibrating annually. If you would like to recalibrate a sensor with your console or interface, please see the sensor recalibration Item #s above; recalibration of a single-channel console or interface is included with these sensor recalibration services at no additional cost.

| Calibration Service Item # | Compatible Consoles & Interfaces  |
|----------------------------|---|
| CAL-PM1                    | PM100D, PM100A, PM400, PM100USB, PM101 Series, PM102 Series, PM103 Series |

The table to the upper right lists the power and/or energy meter consoles and interfaces that can be calibrated using the CAL-PM1 recalibration service. To order the service, enter the Part # and Serial # of the console or interface that requires recalibration prior to selecting Add to Cart.

**Please Note:** To ensure your item being returned for calibration is routed appropriately once it arrives at our facility, please do not ship it prior to being provided an RMA Number and





Part Number:  Serial Number:  65,25 € [Lead Time](#)

Copyright © 1999-2021 Thorlabs, Inc.

[Careers](#)

[Site Index](#)

[Privacy Policy](#)



## Fiber Power Head with Silicon Detector



### Description

---

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

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

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

### Available Accessories

---

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

### Cleaning and Maintenance

---

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

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



## Specifications

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

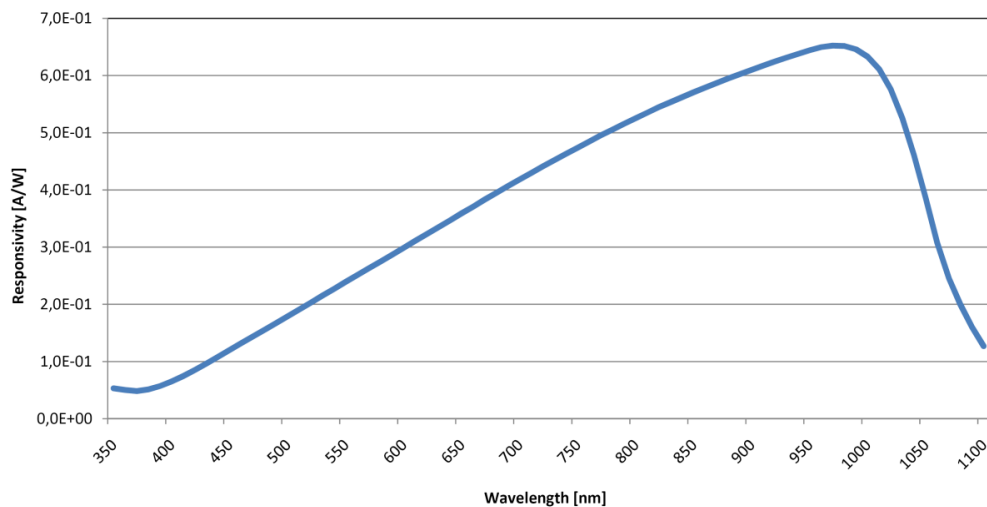
<sup>1)</sup> Measured with PM100D console in bandwidth low setting.

<sup>2)</sup> Beam diameter > 1mm

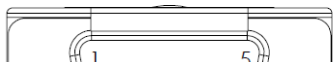
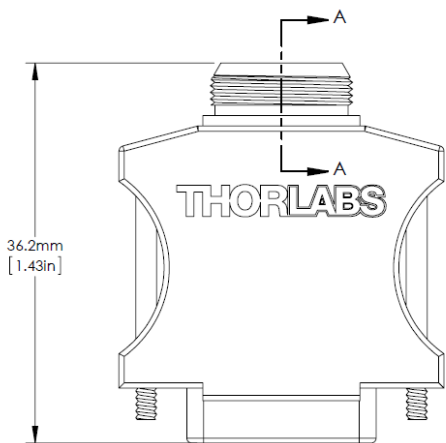
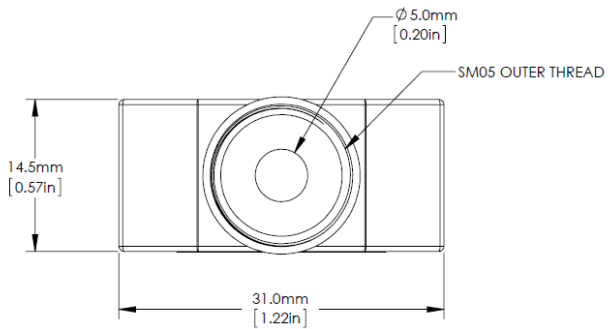
<sup>3)</sup> This specification is valid for S150C devices from serial number 1203xxx. For older versions, please contact technical support.

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

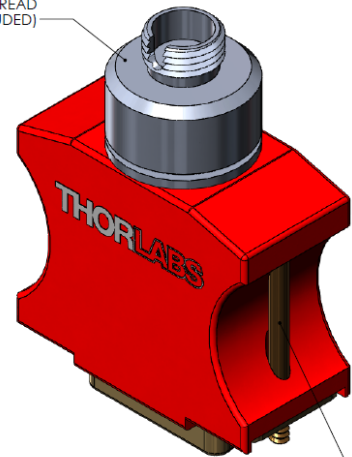
## Typical Response Graph



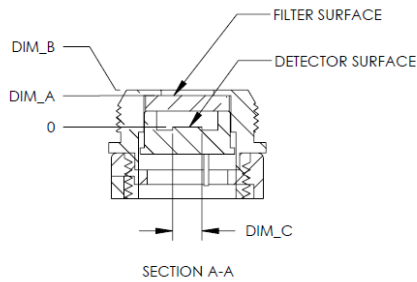
## Drawings



INTERCHANGEABLE FIBER ADAPTER WITH SM05 THREAD (FC INCLUDED)



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



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

### CONNECTOR PIN DIAGRAM

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



## ***Precautions and Warranty Information***

---

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

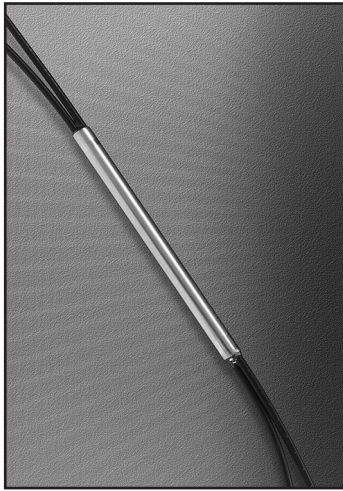
Thorlabs, Inc. Life Support and Military Use Application Policy is stated below:

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

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



# Plastic Plastic Fiber Couplers (Splitters)



## APPLICATIONS

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

## DESCRIPTION

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

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

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

## FEATURES

- ◆ Light, Compact Design
- ◆ Standard Jacketed 1000  $\mu\text{m}$  Core Plastic Fiber Cable
- ◆ High Isolation
- ◆ Light-Tight Stainless Steel Housing
- ◆ Low Loss
- ◆ Excellent Temperature Stability
- ◆ RoHS Compliant

## MAXIMUM RATINGS

( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )  
Operating Temperature Range (TOP)..... $-40^\circ$  to  $85^\circ\text{C}$   
Storage Temperature Range (TSTG)..... $-55^\circ$  to  $85^\circ\text{C}$   
Fiber Bending Radius.....25 mm  
Fiber Tensile Strength.....5 kg

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

**Material:** Fiber couplers are manufactured with Mitsubishi GH4001 1000  $\mu\text{m}$  core jacketed step-index optical fiber. See website for detailed fiber specifications.

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

# Plastic Plastic Fiber Couplers (Splitters)

## CHARACTERISTICS

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

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

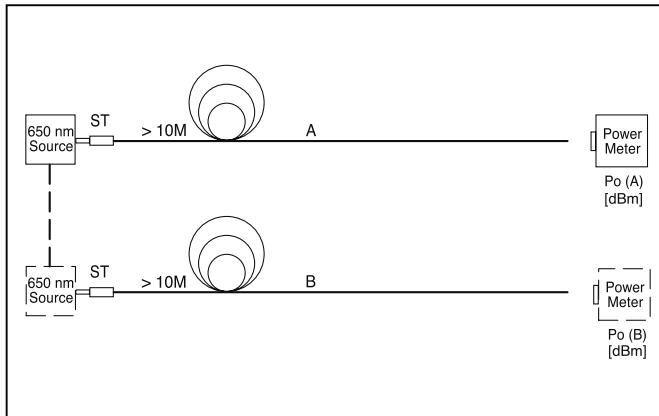


FIGURE 1. Reference measurement - (pre-fused)

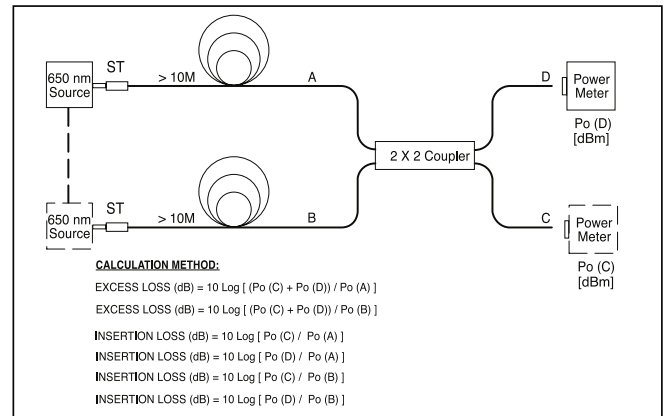


FIGURE 2. Excess & insertion loss measurement - (post-fused)

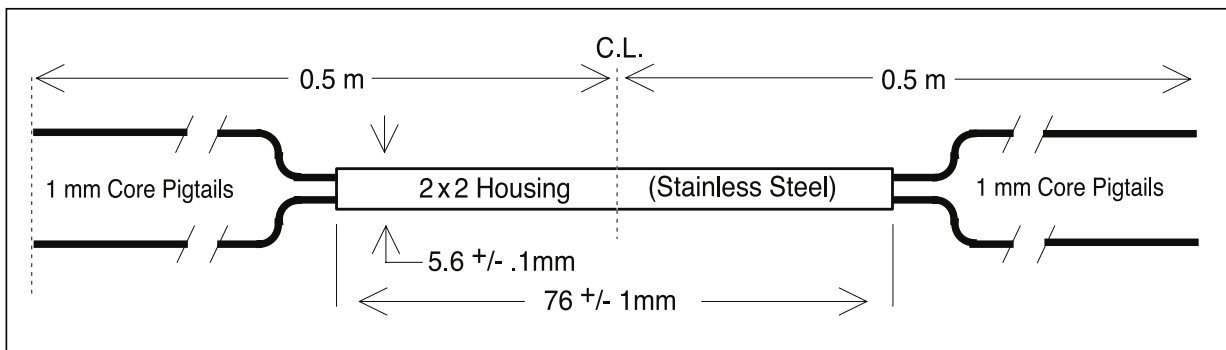
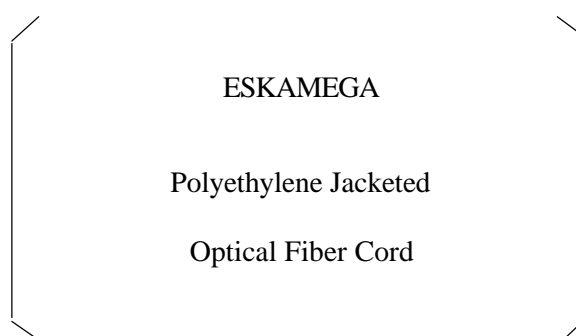


FIGURE 3. Overall Dimensions for 2 × 2 Coupler

# Specification Sheet

## MH 4001



ESKAMEGA

Polyethylene Jacketed

Optical Fiber Cord

High - Performance Plastic Optical Fiber

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

**mitsubishi**  
**RAYON CO., LTD.**  
**ESKA OPTICAL FIBER DIVISION**

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

Phone : + 81 - 3 - 5495 - 3060

Facsimile : + 81 - 3 - 5495 - 3212

1.Scope

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

2.Structure

Table1

MH 4001

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

Sectional View

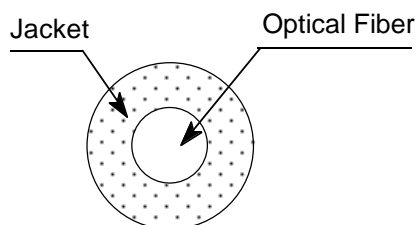


Table2

MH 4001

| Item                          |  | Acceptance Criterion<br>and / or<br>[ Test Condition ]                     | Specification |       |      |      |
|-------------------------------|--|--|---------------|-------|------|------|
|                               |  |  | Unit          | Min.  | Typ. | Max. |
| Maximum<br>Rating             | Storage<br>Temperature                               | No Physical Deterioration<br>[ in a Dry Atmosphere ]                       | °C            | - 55  | —    | + 85 |
|                               | Operation<br>Temperature                             | No Deterioration<br>in Optical Properties*<br>[ in a Dry Atmosphere ]      | °C            | - 55  | —    | + 85 |
|                               | Operation<br>Temperature<br>in a Moist<br>Atmosphere | No Deterioration<br>in Optical Properties**<br>[ under 95 %RH ]            | °C            | —     | —    | + 75 |
| Optical<br>Properties         | Transmission Loss                                    | ϕ50 nm Collimated Light ]  | dB/km         | —     | —    | 160  |
|                               | Transmission Loss<br>under 95 %RH                    | ϕ50 nm Collimated Light ]  | dB/km         | —     | —    | 180  |
| Mechanical<br>Characteristics | Minimum<br>Bend Radius                               | Loss Increment =< 0.5 dB<br>[ A Quarter Bend ]                             | mm            | 25    | —    | —    |
|                               | Repeated Bending<br>Endurance                        | Loss Increment =< 1 dB<br>[ in Conformity to the<br>JIS C 6861 ]           | Times         | 5,000 | —    | —    |
|                               | Tensile Strength                                     | [ Tensile Force at 5Åì<br>Elongation; in Conformity<br>to the JIS C 6861 ] | N             | 70    | —    | —    |
|                               | Twisting Endurance                                   | Loss Increment =< 1 dB<br>[ Sample Length : 1 m<br>Tensile Force : 4.9 N ] | Times         | 5     | —    | —    |
|                               | Impact Endurance                                     | Loss Increment =< 1 dB<br>[ in Conformity to the<br>JIS C 6861 ]           | N.m           | 0.4   | —    | —    |

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

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

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

The specification is subject to change without notice.

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

# Specification Sheet

## GH 4002

ESKA PREMIER

Polyethylene Jacketed

Optical Fiber Cord

High - Performance Plastic Optical Fiber

**E s k a**<sup>™</sup>

**MITSUBISHI RAYON CO., LTD.**  
**ESKA OPTICAL FIBER DIVISION**

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

Phone : + 81 - 3 - 5495 - 3060

Facsimile : + 81 - 3 - 5495 - 3212

## 1.Scope

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

## 2.Structure

| Item                     |                          | Specification |                                |       |       |      |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------|-------|-------|------|
|                          |                          | Unit          | Min.                           | Typ.  | Max.  |      |
| Optical Fiber            | Core Material            | —             | Polymetyl - Methacrylate Resin |       |       |      |
|                          | Cladding Material        | —             | Fluorinated Polymer            |       |       |      |
|                          | Core Refractive Index    | —             | 1.49                           |       |       |      |
|                          | Refractive Index Profile | —             | Step Index                     |       |       |      |
|                          | Numerical Aperture       | —             | 0.5                            |       |       |      |
|                          | Core Diameter            | $\mu$ m       | 920                            | 980   | 1,040 |      |
|                          | Cladding Diameter        | $\mu$ m       | 940                            | 1,000 | 1,060 |      |
| Number of Fibers         |                          | —             | 2                              |       |       |      |
| Jacket                   | Material and Color       | —             | Polyethylene                   |       |       |      |
|                          | Dimension                | Minor Axis    | mm                             | 2.13  | 2.20  | 2.27 |
|                          |                          | Major Axis    | mm                             | 4.3   | 4.4   | 4.5  |
| Indication on the Jacket |                          | —             | ESKA PREMIER :Pink color       |       |       |      |
| Approximate Weight       |                          | g / m         | 8                              |       |       |      |

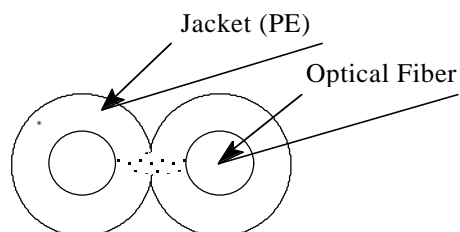
Sectional View



Table2

GH 4002

| Item                          |  | Acceptance Criterion<br>and / or<br>[Test Condition ]                      | Specification |        |      |      |
|-------------------------------|--|--|---------------|--------|------|------|
|                               |  |  | Unit          | Min.   | Typ. | Max. |
| Maximum<br>Rating             | Storage<br>Temperature                   | No Physical Deterioration  | °C            | - 55   | —    | + 85 |
|                               | Operation<br>Temperature                 | No Deterioration<br>in Optical Properties*                                 | °C            | - 55   | —    | + 85 |
|                               | Operation<br>Temperature<br>under 95 %RH | No Deterioration<br>in Optical Properties**                                | °C            | —      | —    | + 75 |
| Optical<br>Properties         | Transmission Loss                        | [ 650 nm Collimated Light ]  | dB / km       | —      | —    | 170  |
|                               | Transmission Loss<br>under 95 %RH        | [ 650 nm Collimated Light ]  | dB / km       | —      | —    | 190  |
| Mechanical<br>Characteristics | Minimum<br>Bend Radius                   | Loss Increment =< 0.5 dB<br>[ Quarter bend ]                               | mm            | 25     | —    | —    |
|                               | Repeated Bending<br>Endurance            | Loss Increment =< 1dB<br>[90° 25 mmR<br>Dead Weight : 500 g ]              | Times         | 10,000 | —    | —    |
|                               | Tensile Strength                         | [Tensile Force at 5%<br>Elongation; in Conformity<br>to the JIS C 6861 ]   | N             | 140    | —    | —    |
|                               | Twisting Endurance                       | Loss Increment =< 1 dB<br>[ Sample Length : 1 m<br>Tensile Force : 4.9 N ] | Times         | 5      | —    | —    |
|                               | Impact Endurance                         | Loss Increment =< 1 dB<br>[ in Conformity to the<br>JIS C 6861 ]           | N.m           | 0.4    | —    | —    |

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

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

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

The specification is subject to change without notice.

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

# ESKA™ Polyethylene Jacketed Optical Fiber Cord: BH4001

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

January 2010

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

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

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

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

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

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

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

## Applications

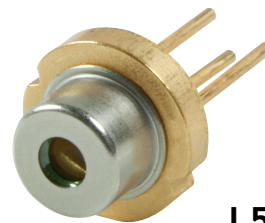
The BH-Series of single-jacketed cables are typically used as data and sensor media for higher temperature requirements.

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



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

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



**L520P50**

### Description

This 520 nm, 50 mW laser diode is a compact light source suited for a variety of applications including fluorescence and spectroscopic measurements, DNA sequencing, flow cytometry, imaging, and microscopy. It comes in a Ø5.6 mm TO package with an A pin configuration. It is recommended to have the base of the laser diode in good thermal contact with a heat sink.

### Specifications

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

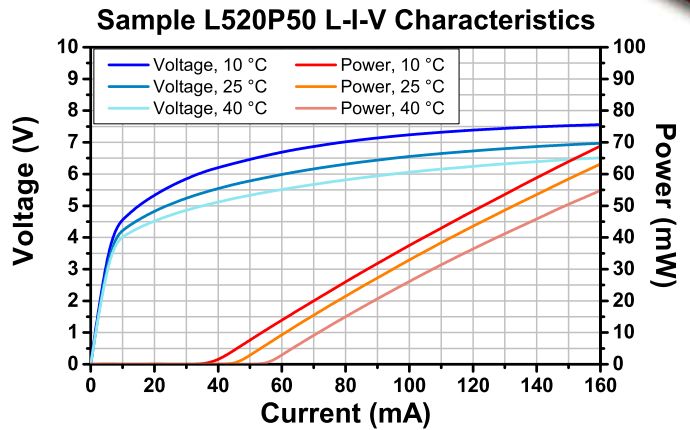
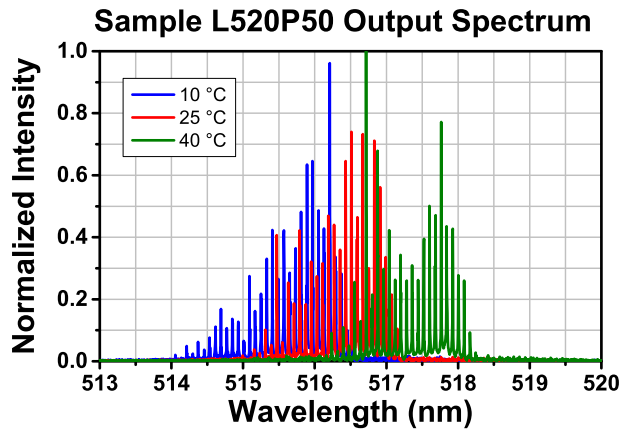


\*Absolute Maximum Rating specifications should never be exceeded. Operating at or beyond these conditions can permanently damage the laser.

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

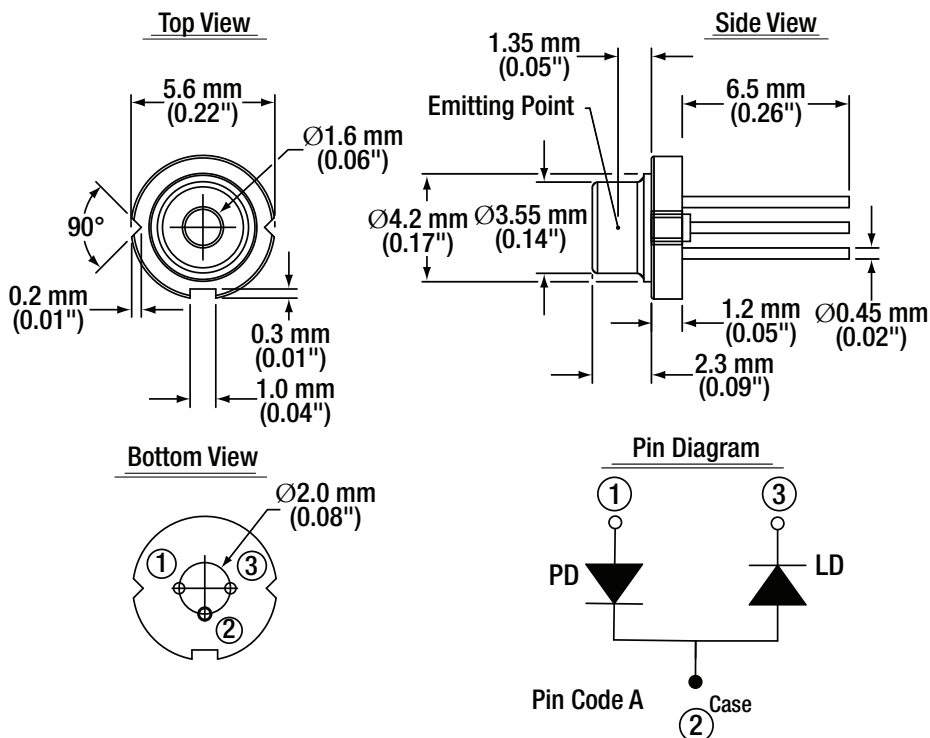
T<sub>CASE</sub> = 25 °C

## Performance Plots



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

## Drawings



| Pin | Description |
|-----|-------------|
| 1   | PD Anode    |
| 2   | Case        |
| 3   | LD Cathode  |

## Laser Diode



L650P007



### Description

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

### Specifications

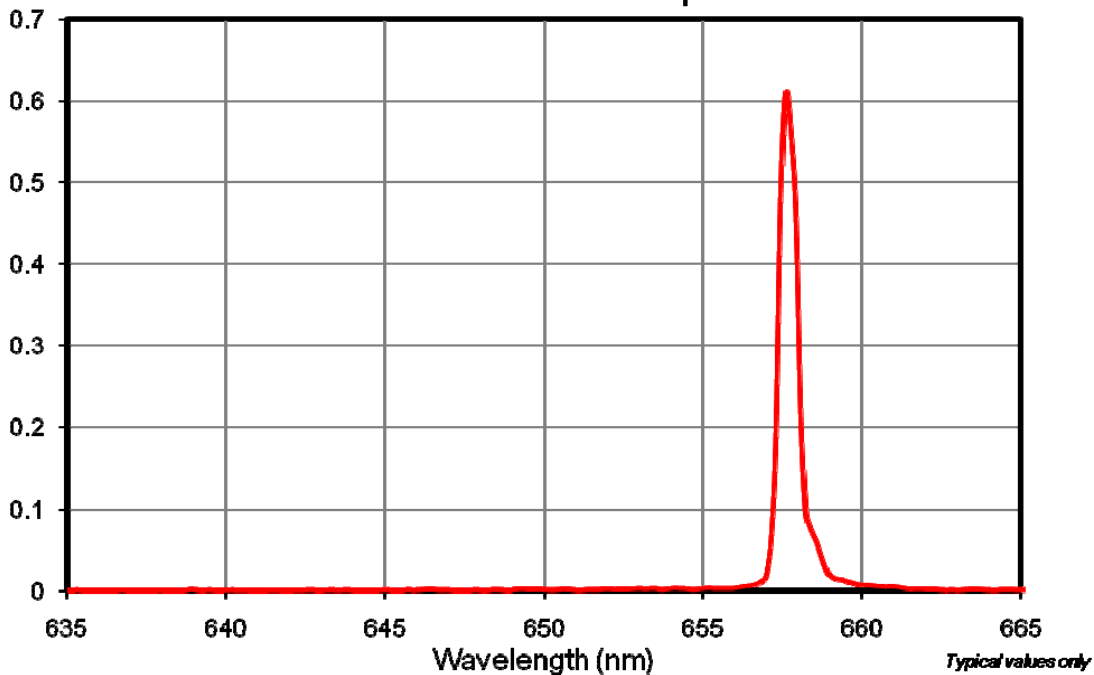
( $P_o = 7 \text{ mW}$ ,  $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

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

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



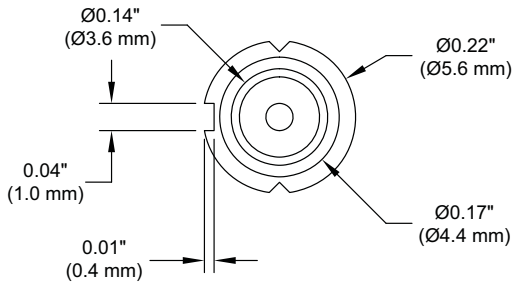
L650P007 Normalized Output Power



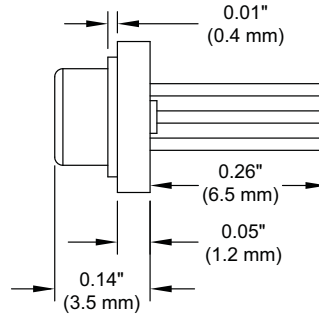
## Drawings



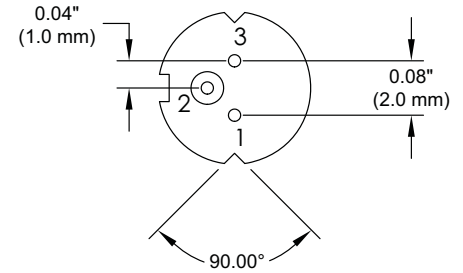
### Top View



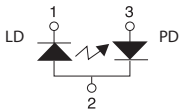
### Side View



### Bottom View



#### Pin Code 5A



#### Pin Description

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

#### USA, Canada, and South America

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

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

#### Europe

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

#### Scandinavia

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

#### UK and Ireland

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

#### Japan and Asia

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

#### France

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

#### China

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







## O/E Converter

HOME > Product > SPA-2

\*\* Japanese version \*\*

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

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

[SPD-2\\_520nm](#)

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

[SPD-3](#)

[SPD-4](#)

Visible wavelength O/E  
(Max NA = 0.5)

[SPA-2\\_650nm](#)

[SPA-3](#)

[SPA-4](#)

Visible wavelength O/E  
(Hi-Sensitivity)

[SPS-1](#)

[SPS-2](#)

NIR wavelength O/E

[LPD-1](#)

[LPD-2](#)

[LPS-1](#)

[LPS-2](#)

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

Option

[Downloa\(PDF\)](#)

[O/E Selection Guide](#)

[O/E Instruction](#)

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

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

[JSTnews](#)

[E/O LD Source](#)

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

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

[8xDFB-LD Laser](#)

[HF level variable LD source](#)

[Optical Coupler](#)

[Optical Link System for Linac](#)

[Optical Link for TTL](#)

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



Features:

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

[1] Specifications

[2] Lens system

[3] Spectral Sensitivity (by calculation)

[4] Step Response and Frequency Characteristics (Example)

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

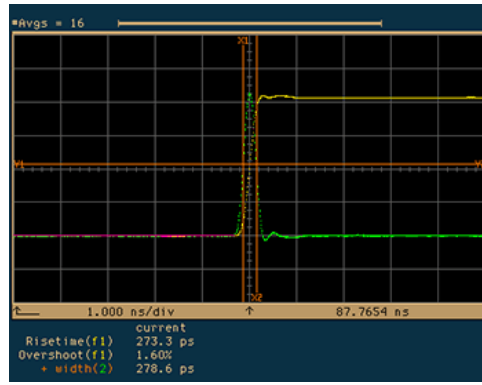
[6] options

[1] Specifications

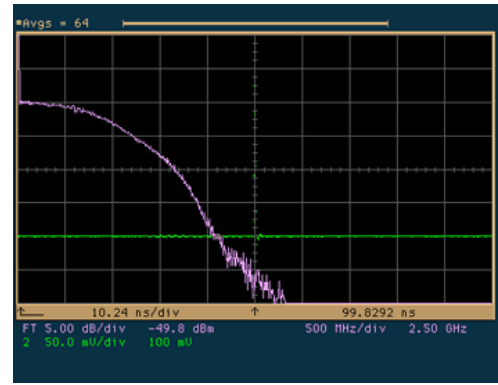
| Item \ Model Name  | SPA-2_650nm      |
|--|------------------|
| Reference Wavelength   | 658nm            |
| Receivable Wavelength Range                                  | 380 to 1000nm    |
| Maximum Core Diameter  | $\phi$ 1.0mm     |
| Acceptable NA. Range   | 0.5 or less      |
| Optical Input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







Step Response of SPA-2\_650nm  
Rise time: 360ps, Overshoot : 2.87%



Frequency Characteristics of SPA-2\_650nm  
-3dB (Electrical) Frequency : Approx. 1.0GHz

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

[6] [options](#)

Contact Us



Product Info.

O/E Selection Guide  
Frequency characteristic dependence on the wavelength  
O/E Dual balanced PD(for OCT)  
Dual-PD Sensor Amplifier for AFM

Options  
O/E Instruction  
Waveform Analyzer  
Video Line Inserter  
Optical Coupler  
Bessel filter(BPS,LPF...)

E/O Converter(400nm~ )  
E/O VCSEL(670nm)  
E/O VCSEL(850nm)  
Reference light source  
HF level variable LD source  
Optical Link (TTL)  
Optical Link (NIM)

Optical Link:Analog\_2KHz~3GHz  
TDM Opt-communication System

Technical Support

Technical Reports  
CAD data

Other information

Exhibition  
Warranty and Repair  
Certificate(Sample)  
Technical Research

Service

Demo (O/E,E/O)  
Parameter Sheet  
Technical consultation

Development&Consultation Company Profile

Introduction of development  
Q&A

Company Profile  
SolutionGuide  
Career

Download

LINK

First Mechanical Design Corporation.  
(Tokorozawa-city Saitama Japan)  
TIRI (Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute)  
INOVATION TAMA26  
(Tokyo Metropolitan inter-industry exchange Grp.)  
JST\_news (AFM 2017\_08)

TAMA (Technology Advanced Metropolitan Area) Association  
TAMA Association: Info. of Graviton  
Japan Atomic Energy Agency (J-PARC)  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Distributors(Overseas)

USA :Insight Photonic Solutions,Inc.  
Taiwan :COTE TECH CO.,LTD.  
Korea :M&M Corporation

Distributors(Japan)

I-Wave Corporation.  
Nihon Denkei co.ltd.  
HIGH-TECH CORPORATION  
Hodaka Denshi Co.,Ltd.  
Tell me what you business partner.

RoHS

Terms and Conditions

Guidelines

Compliance

Privacy protection

SitePolicy

Access

Sitemap







## O/E Converter

HOME > Product > SPD-2

\*\* Japanese version \*\*

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

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

[SPD-2\\_520nm](#)

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

[SPD-3](#)

[SPD-4](#)

Visible wavelength O/E  
(Max NA = 0.5)

[SPA-2\\_650nm](#)

[SPA-3](#)

[SPA-4](#)

Visible wavelength O/E  
(Hi-Sensitivity)

[SPS-1](#)

[SPS-2](#)

NIR wavelength O/E

[LPD-1](#)

[LPD-2](#)

[LPS-1](#)

[LPS-2](#)

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

Option

[Downloa\(PDF\)](#)

[O/E Selection Guide](#)

[O/E Instruction](#)

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

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

[JSTnews](#)

[E/O LD Source](#)

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

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

[8xDFB-LD Laser](#)

[HF level variable LD source](#)

[Optical Coupler](#)

[Optical Link System for Linac](#)

[Optical Link for TTL](#)

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



Features:

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

[1] Specifications

[2] Lens system

[3] Spectral Sensitivity (by calculation)

[4] Step Response and Frequency Characteristics (Example)

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

[6] options

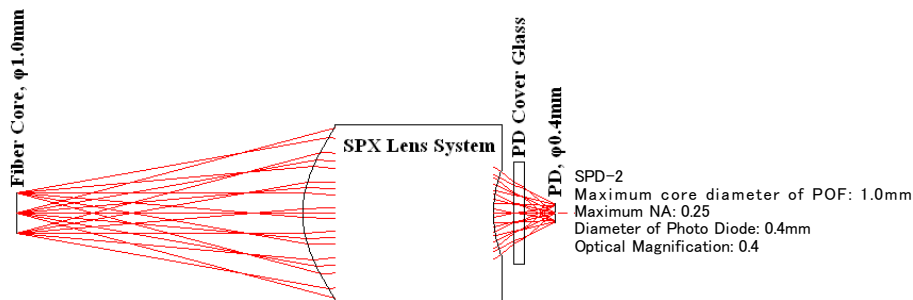
[1] Specifications

| Item \ Model Name  | SPD-2_650nm      | SPD-2_850nm      |
|--|------------------|------------------|
| Reference Wavelength   | 658nm            | 850nm            |
| Receivable Wavelength Range                                  | 380 to 1000nm    | 380 to 1000nm    |
| Maximum Core Diameter  | $\phi$ 1.0mm     | $\phi$ 1.0mm     |
| Acceptable NA. Range   | 0.25 or less     | 0.25 or less     |
| Optical Input Connector (Standard)                           | FC receptacle    | FC receptacle    |
| Photodetector Type   | Si PIN PD        | Si PIN PD        |
| Active diameter of Photodetector                             | $\phi$ 0.4mm     | $\phi$ 0.4mm     |
| Sensitivity (Conversion Gain at Reference Wavelength)        | 1,000V/W         | 1,000V/W         |
| Output Saturation Optical Input Power (Reference Wavelength) | -4dBm            | -4dBm            |
| Convertible Frequency Bandwidth                              | DC to 1.2GHz     | DC to 1.2GHz     |
| Output Noise Level   | 1.9mVrms or less | 1.9mVrms or less |
| Noise Equivalent Optical Power at Reference Wavelength       | -27.3dBm or less | -27.3dBm or less |

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

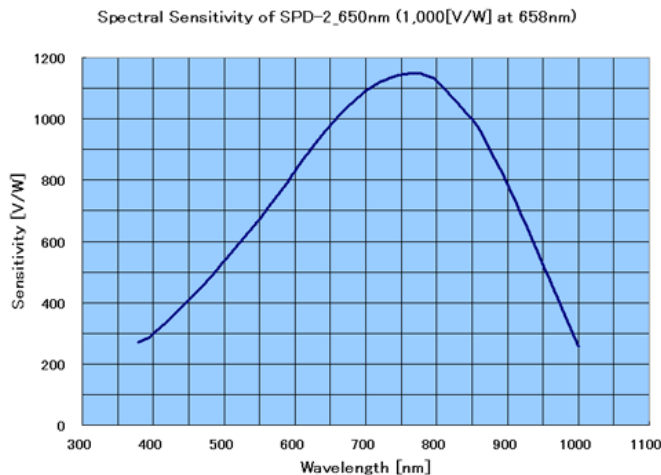
| Item \ Model Name                      | SPD-2_650nm   | SPD-2_850nm   |
|--|---------------|---------------|
| Electrical Output Connector (Standard) | BNC plug      | BNC plug      |
| Output Impedance                       | 50 ohms       | 50 ohms       |
| Output Offset Voltage               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

[2] Lens System



[3] Spectral Sensitivity (by calculation)

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

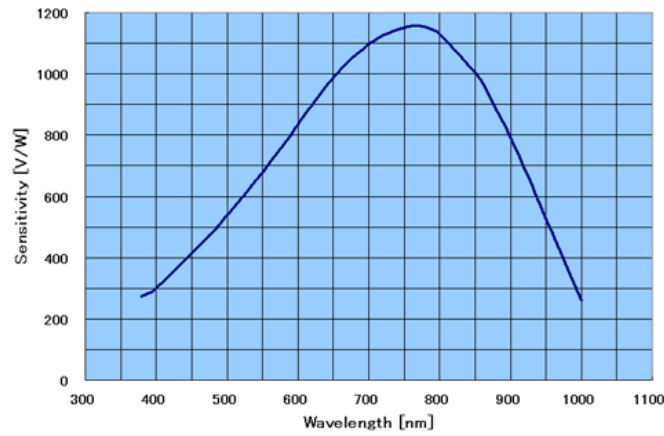


SPD-2\_850nm  
 Reference wavelength: 850nm  
 Maximum sensitivity: at 770nm

Sensitivities vs wavelength

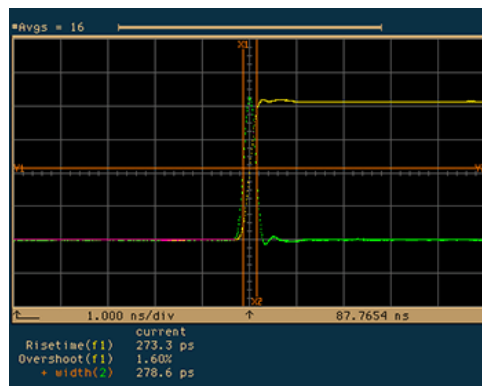
| Sensitivity [V/W] | Wavelength [nm] |
|-------------------|-----------------|
| 298               | 400             |
| 539               | 500             |
| 834               | 600             |
| 1098              | 700             |
| 1133              | 800             |
| 795               |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

Spectral Sensitivity of SPD-2\_850nm (1,000[V/W] at 850nm)



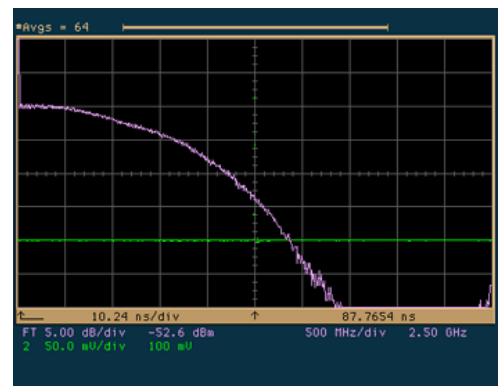
[4] Step Response and Frequency Characteristics (Example)  
SPD-2\_650nm

Receivable Wavelength Range



Step Response of SPD-2\_650nm  
Rise time: 273.3ps, Overshoot : 1.60%

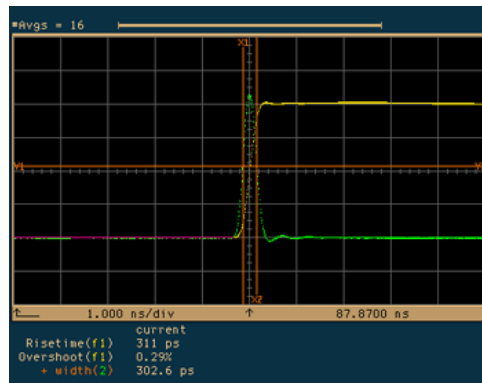
Reference Wavelength



Frequency Characteristics of SPD-2\_650nm  
-3dB (Electrical) Frequency : Approx. 1.2GHz

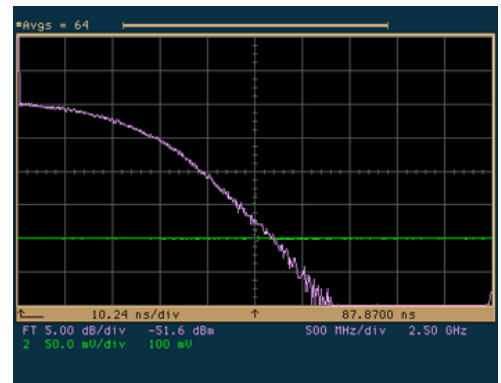
SPD-1\_850nm

Receivable Wavelength Range



Step Response of SPD-2\_850nm  
Rise time: 311ps, Overshoot : 0.29%

Reference Wavelength



Frequency Characteristics of SPD-2\_850nm  
-3dB (Electrical) Frequency : Approx. 1.2GHz

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

[6] options

Contact Us



Product Info.

O/E Selection Guide  
Frequency characteristic dependence on the wavelength  
O/E Dual balanced PD(for OCT)  
Dual-PD Sensor Amplifier for AFM

Options  
O/E Instruction  
Waveform Analyzer  
Video Line Inserter  
Optical Coupler  
Bessel filter(BPS,LPF...)

E/O Converter(400nm~ )  
E/O VCSEL(670nm)  
E/O VCSEL(850nm)  
Reference light source  
HF level variable LD source  
Optical Link (TTL)  
Optical Link (NIM)

Optical Link:Analog\_2KHz~3GHz  
TDM Opt-communication System

Technical Support

Technical Reports  
CAD data

Other information

Exhibition  
Warranty and Repair  
Certificate(Sample)  
Technical Research

Service

Demo (O/E,E/O)  
Parameter Sheet  
Technical consultation

Development&Consultation Company Profile

Introduction of development  
Q&A

Company Profile  
SolutionGuide  
Career

Download

LINK

First Mechanical Design Corporation.  
(Tokorozawa-city Saitama Japan)  
TIRI (Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute)  
INOVATION TAMA26  
(Tokyo Metropolitan inter-industry exchange Grp.)  
JST\_news (AFM 2017\_08)

TAMA (Technology Advanced Metropolitan Area) Association  
TAMA Association: Info. of Graviton  
Japan Atomic Energy Agency (J-PARC)  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Distributors(Overseas)

USA :Insight Photonic Solutions,Inc.  
Taiwan :COTE TECH CO.,LTD.  
Korea :M&M Corporation

Distributors(Japan)

I-Wave Corporation.  
Nihon Denkei co.ltd.  
HIGH-TECH CORPORATION  
Hodaka Denshi Co.,Ltd.  
Tell me what you business partner.

RoHS

Terms and Conditions

Guidelines

Compliance

Privacy protection

SitePolicy

Access

Sitemap



©1992 Graviton Inc.





## VARIABLE FIBER OPTIC ATTENUATORS – BLOCKING RECEPTACLE STYLE

### Features:

- Compact, rugged housing
- High resolution
- Wide wavelength range (from 350 to 2050nm)
- Wide variety of connectors available
- Polarization insensitive
- LOW COST!

### Applications:

- CATV, LAN and Telecommunications use
- Receiver padding
- Test and measurement
- Optical power equalization

### Product Description:

Variable attenuators consist of two baseplates with lenses. The two baseplates are aligned for optimum coupling efficiency using a patented alignment technique. A threaded radial screw is used to block the collimated beam between the two lenses. Rotating the screw changes its position within the collimated beam, thus varying the power level coupled into the receiver fiber. Because the attenuator works by directly blocking the beam, it is polarization insensitive.

Because of limitations in receptacle tolerances, receptacle style attenuators are not recommended for singlemode or polarization maintaining applications requiring low losses and good repeatability. Instead, please refer to the data sheet titled *Variable Fiber Optic Attenuators, Blocking Pigtail Style*.

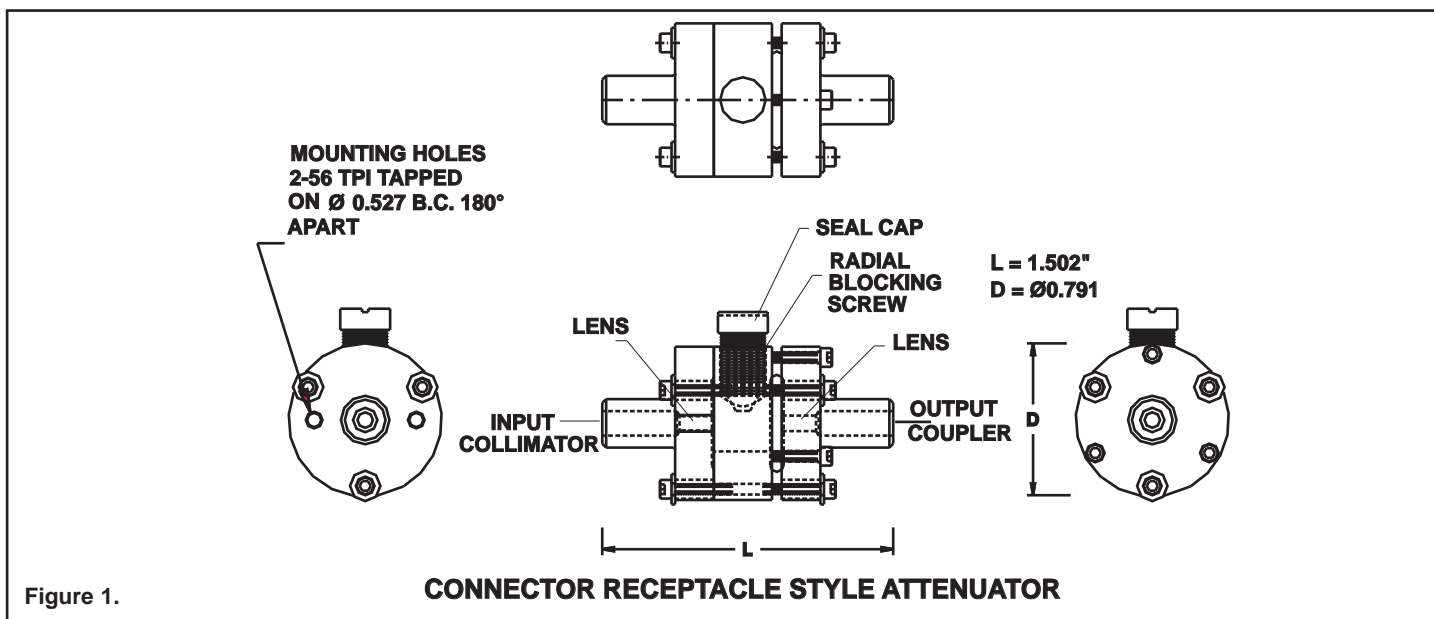


Figure 1.

## Ordering Information for Standard Parts:

| Bar Code | Part Number           | Description   |
|----------|-----------------------|---|
| 187      | BB-200-33-633-M       | Receptacle style variable attenuator at 633nm for multimode applications with female FC receptacles on both sides.                                    |
| 8908     | BB-200-33-700-M       | Receptacle style variable attenuator at 700nm for multimode applications with female FC receptacles on both sides.                                    |
| 9369     | BB-200-33-1300/1550-M | Receptacle style variable attenuator at 1300/1550nm for multimode applications with female FC receptacles on both sides.                              |
| 188      | BB-200-55-633-M       | Receptacle style variable attenuator at 633nm for multimode applications with female SMA 905 receptacle on both ends.                                 |
| 11094    | BB-200-55-820-M       | Receptacle style variable attenuator at 820nm for multimode applications with female SMA 905 receptacles on both sides.                               |
| 11095    | BB-200-55-1300-M      | Receptacle style variable attenuator at 1300nm for multimode applications with female SMA 905 receptacle on both ends.                                |
| 8033     | BB-200-58-690-M       | Receptacle style variable attenuator at 690nm for multimode applications with female SMA 905 receptacle on input end and ST receptacle on output end. |
| 9277     | BB-200-88-800-M       | Receptacle style variable attenuator at 800nm for multimode applications with female ST receptacles on both sides.                                    |
| 5821     | BB-200-88-904-M       | Receptacle style variable attenuator at 904nm for multimode applications with female ST receptacles on both sides.                                    |
| 2169     | BB-200-88-1300-M      | Receptacle style variable attenuator at 1300nm for multimode applications with female ST receptacles on both sides.                                   |

## Standard Product Specifications:

|                        |   |
|------------------------|---|
| Insertion Loss:        | Typically 2dB for multimode attenuators                                     |
| Backreflection:        | 15dB for receptacle style attenuators (BB-200 style),                       |
| Attenuation Range:     | 2 to 80 dB with 0.01dB resolution up to 10dB, 0.1dB resolution up to 30 dB  |
| Available Wavelengths: | 350-2050nm  |
| Vibration:             | Less than ±0.05dB change between 10Hz-55Hz, 1.52 mm amplitude, for 2 hours. |

## Ordering Examples For Standard Parts:

A customer needs a variable attenuator with female ST receptacles for 1300nm wavelength for a multimode application. In this case the OZ Part number, barcode and description will be:

| Bar Code | Part Number      | Description  |
|----------|------------------|--|
| 2169     | BB-200-88-1300-M | Receptacle style variable attenuator at 1300nm for multimode applications with female ST receptacles on both sides |

## Ordering Information For Custom Parts:

OZ Optics welcomes the opportunity to provide custom designed products to meet your application needs. As with most manufacturers, customized products do take additional effort so please expect some differences in the pricing compared to our standard parts list. In particular, we will need additional time to prepare a comprehensive quotation, and lead times will be longer than normal. In most cases non-recurring engineering (NRE) charges, lot charges, and a 10 piece minimum order will be necessary. These points will be carefully explained in your quotation, so your decision will be as well informed as possible. We strongly recommend buying our standard products.

## Questionnaire For Custom Parts:

1. What is the application?
2. What wavelengths do you plan on using?
3. What power level do you need to handle?
4. What size multimode fiber do you plan on using?

### Receptacle style attenuator:

Female Receptacle Code: 3 = NTT-FC/PC, Super, and Ultra NTT-FC/PC  
8 = AT&T-ST  
5 = SMA 905  
SC = SC

### BB-200-XY-W-M

Fiber type:  
S=Singlemode  
M=Multimode  
P=Polarization Maintaining

Wavelength: Specify in nanometers  
(Example: 633 for 633nm)



## Ordering Examples For Custom Parts:

A customer needs a receptacle style variable attenuator with SMA 905 receptacle on input side and FC receptacle on output side for a multi-mode application at 1300/1550 nm. In this case OZ part number will be: **BB-200-53-1300/1550-M**

## Frequently Asked Questions (FAQs):

**Q:** What advantages or disadvantages does the beam blocking version have over the neutral density versions?

**A:** The beam blocking technique is naturally suited for high power applications, and can achieve greater attenuation levels. The neutral density version shows less mode dependence or modal noise in multimode applications.

**Q:** What do you mean by mode dependence and modal noise?

**A:** The term multimode means there is more than one path for light to travel inside a single fiber. These paths are known as modes. It does not mean the unit consists of multiple fibers in a bundle. When coherent laser light is coupled into multimode fiber, the output shows speckles. Bending the fiber causes the speckle pattern to change. If the losses in a system depend on which modes are excited, then changing the modes excited in the fiber changes the output power. This is known as modal noise. If the source being used is an LED, then one does not see speckles, and modal noise is not an issue. However, for laser sources, modal noise is an issue. When blocking style attenuators are used with multimode fiber, some modes are blocked, while others are transmitted. This can produce 1dB or greater modal noise fluctuations with coherent sources. A variable attenuator using a neutral density filter is not as strongly affected by modal noise. However, neutral density filter attenuators offer lower attenuation range (around 40dB) and can only handle about 50mW of power.

**Q:** Do 1300/1550nm attenuators work at other wavelengths?

**A:** Yes, they do. They can also be used for the S (1470-1520nm), C (1520-1570nm) and L (1570-1620nm) bands, with little variation in attenuation.

## Application Notes:

The variable attenuator can be used to measure or test the dynamic range of power detectors. Figure 2 illustrates a possible set up for such an application. OZ Optics variable attenuators are very useful to measure high dynamic ranges for detectors because of their high attenuator levels (up to 80dB). By changing the attenuation level the maximum dynamic range of the power detector can be found.

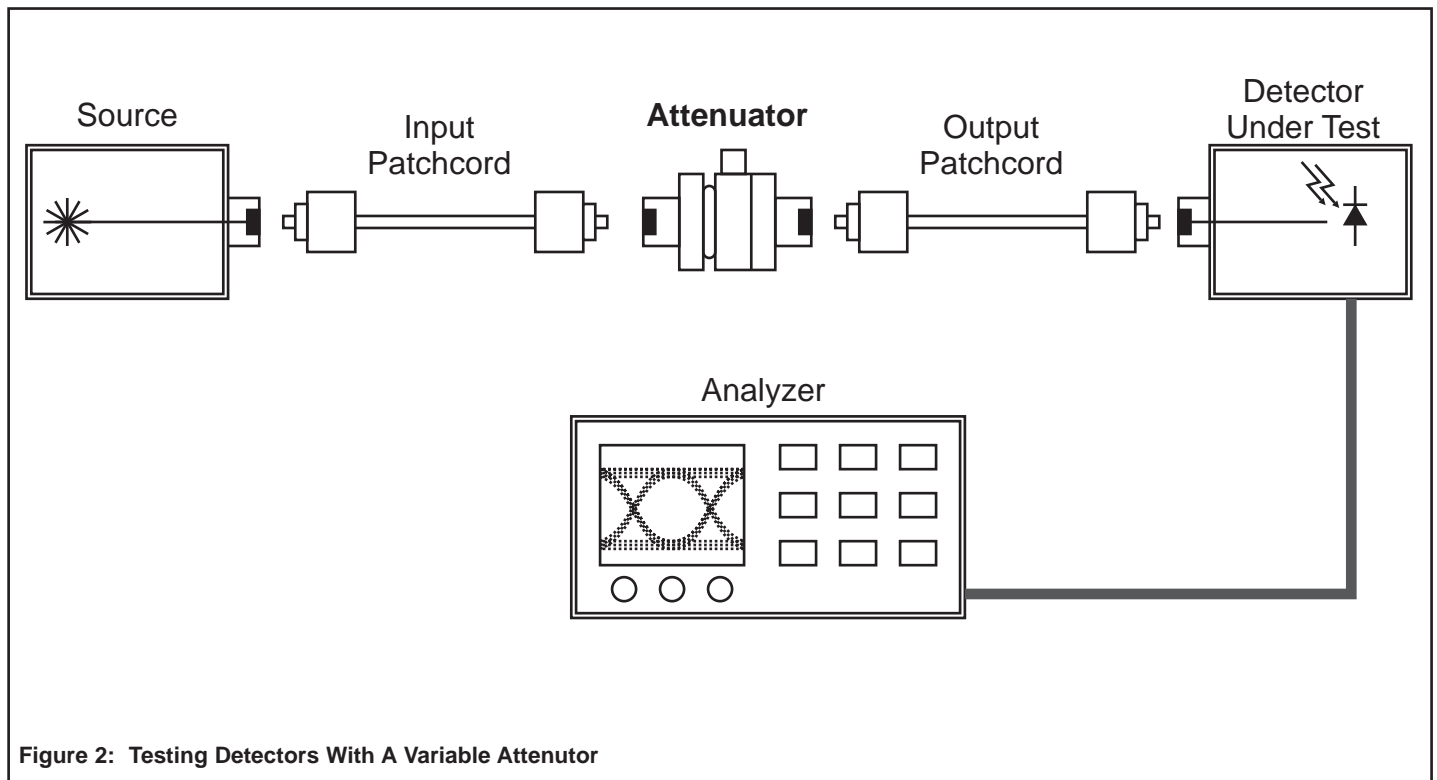


Figure 2: Testing Detectors With A Variable Attenuator



# OZ OPTICS LTD.

219 Westbrook Rd.

Ottawa, Ontario, Canada, K0A 1L0

Tel: 613-831-0981 Toll Free: 1-800-361-5415 Fax: 613-836-5089

Email: sales@ozoptics.com Website: www.ozoptics.com

## CERTIFICATE OF COMPLIANCE

Fiber Optic Attenuator

**Customer:** University of Zaragoza

**Work Order:** 202688

**PO#:** Q99786

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

### TEST CONDITIONS

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

### RESULTS

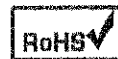
| Attenuator<br>Serial<br>Number | Insertion<br>Loss (dB) | SET UP #1                 |                            | SET UP #2                 |                            | Back<br>Reflection<br>(dB) | 50 cm Drop Test<br>(±dB change at<br>20dB attenuation) |
|--------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------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

### NOTES

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

**Test Engineer:** Suzana Uzicanin

**Date:** 29 Aug 2016



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

---

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

**IMPORTANT: DO NOT ADJUST OTHER SCREWS.**

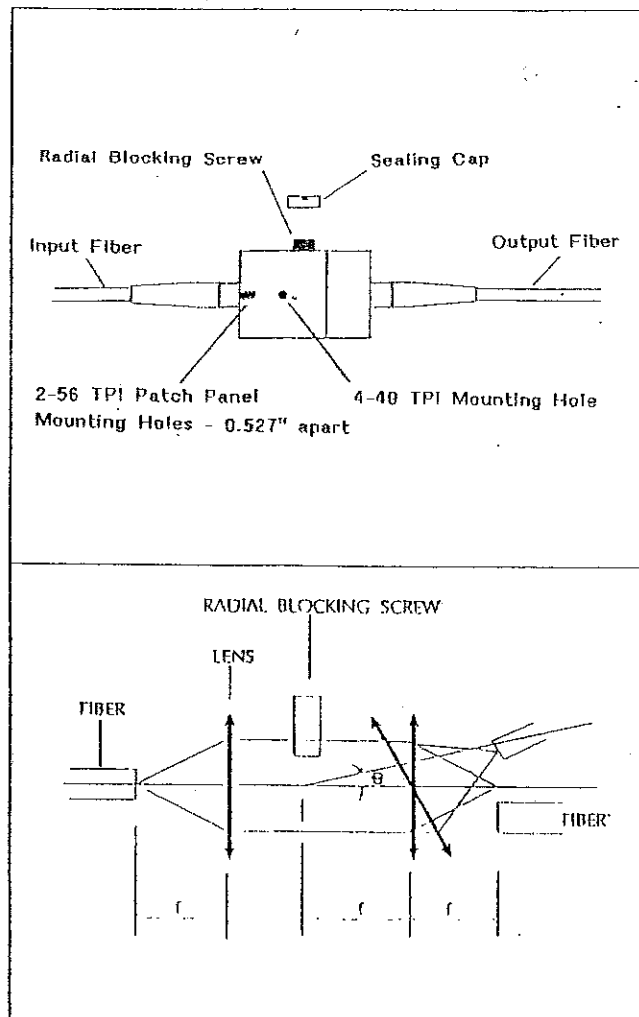
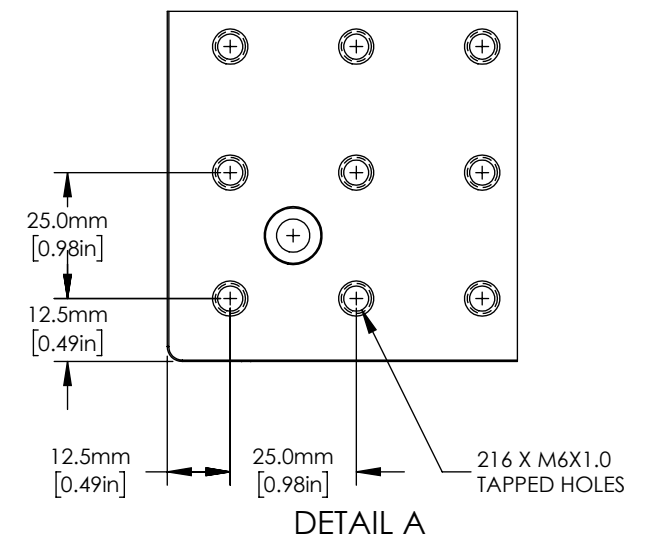
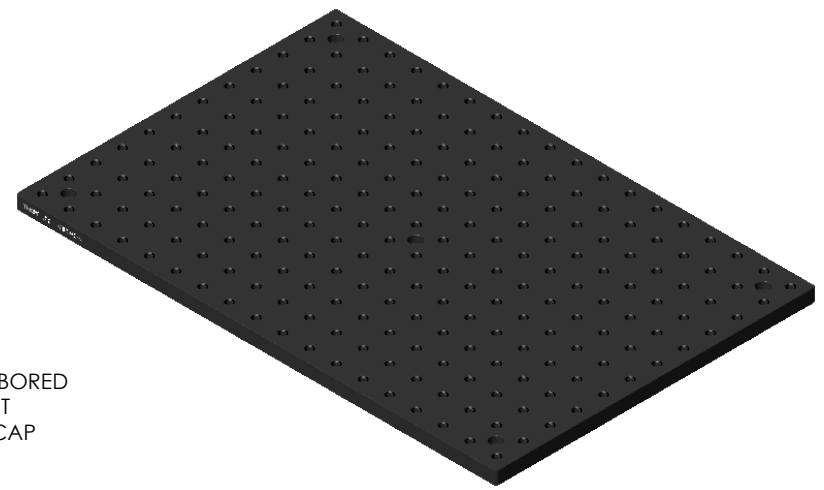
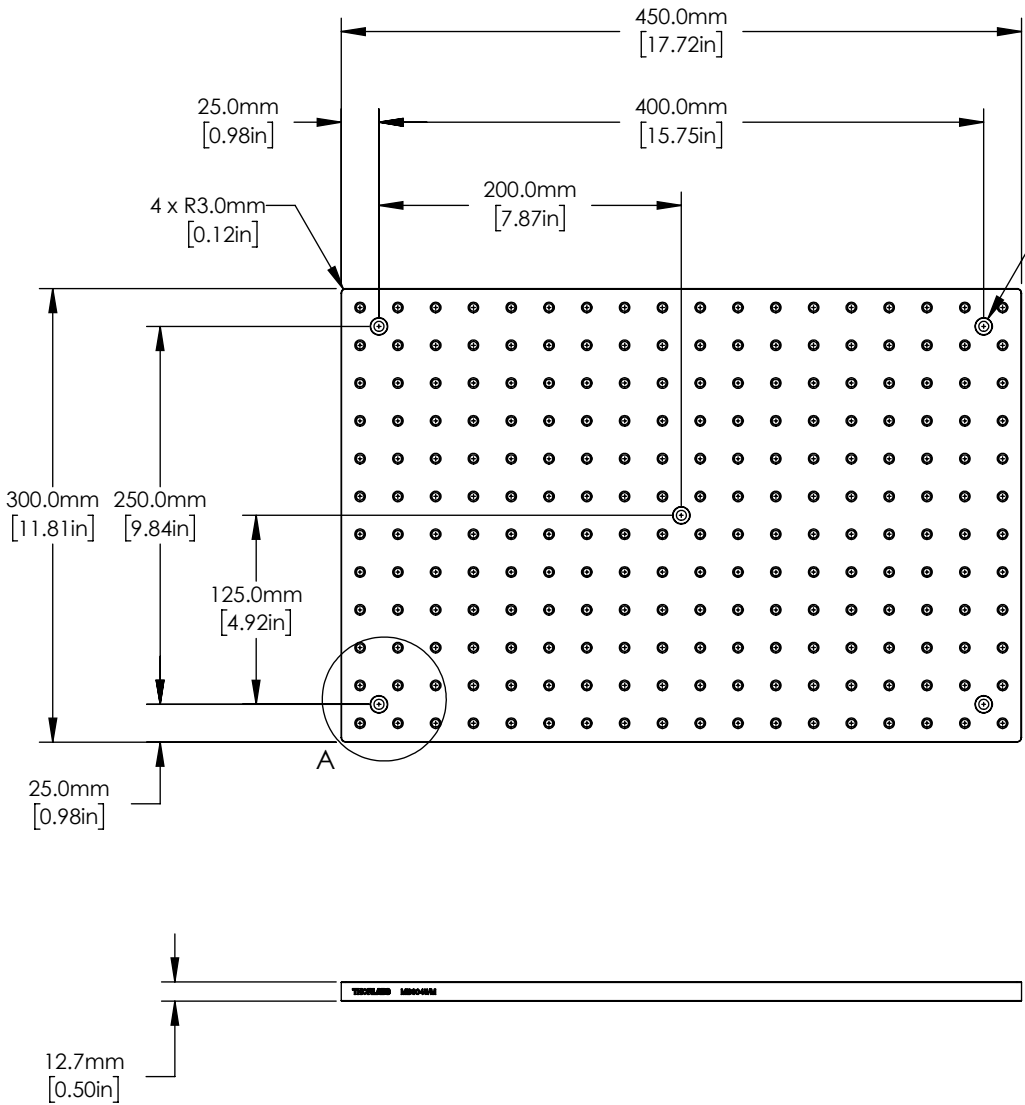


Figure 1. Operating principle of a variable attenuators using the blocking technique.



FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

|   |      |   |                                     |               |
|---|------|---|-------------------------------------|---------------|
| DRAWING PROJECTION  |      |   | <b>THORLABS</b><br>www.thorlabs.com |               |
| NAME  | DATE | ALUMINIUM BREADBOARD 300 X 450 X 12.7mm |                                     |               |
| DRAWN   | CJL  | 16/JAN/18                               | MATERIAL                            |               |
| APPROVAL  | DC   | 16/JAN/18                               | ALUMINIUM                           |               |
| COPYRIGHT © 2018 BY THORLABS  |      |   | ITEM #                              | APPROX WEIGHT |
| VALUES IN PARENTHESIS ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND OFF ERRORS |      |   | MB3045/M                            | 4.40 kg       |
|   |      |   | REV                                 | B             |