



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Caracterización de fibras ópticas de plástico  
mediante inyección por fibra de vidrio

Autor/es

Jorge Learte Liarte

Director/es

María Ángeles Losada Binué

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) - Zaragoza  
2016



DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

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

D./D<sup>a</sup>. Jorge Learte Liarte

con nº de DNI 73220100Z en aplicación de lo dispuesto en el art.

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

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

Caracterización de fibras ópticas de plástico mediante inyección por fibra de vidrio

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

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

Zaragoza, 20 de Junio de 2016

Fdo: Jorge Learte Liarte





# Agradecimientos

---

A mi familia, en especial a mis padres y a mi hermano por ser mi punto de apoyo en todo momento. A los que ya no están, que están cerca pero no a mi lado.

A mis amigos y compañeros de clase por todos esos momentos que han hecho más fácil este camino.

A todos los profesores, en especial a M<sup>a</sup> Ángeles por los consejos y ayuda siempre que he necesitado y al grupo de POF por la gran oportunidad que me han brindado.

A mis compañeros de laboratorio Estela, Frank y Nacho por los buenos momentos que hemos pasado.

¡GRACIAS A TODOS!



# Resumen

---

El objetivo de este proyecto se integra en la caracterización experimental y modelado de fibras ópticas de plástico (Plastic Optical Fibres, POFs), que es una de las líneas de investigación del grupo de POF del Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. El objetivo ha sido diseñar y realizar un bloque de inyección basado en fibra mono-modo de visible para su aplicación en la caracterización de fibras de plástico y dispositivos o perturbaciones localizadas en estas fibras.

El sistema de inyección desarrollado permite inyectar luz de forma localizada y precisa sobre la superficie de la fibra de plástico y además, variar el ángulo de entrada en la fibra. Para ello, se ha adaptado el sistema de registro de imágenes de campo lejano (Far Field Pattern, FFP) con barrido angular de la inyección de forma que esta se realiza mediante fibra mono-modo de visible en lugar de con un láser de He-Ne y el barrido angular se lleva a cabo rotando esta fibra en lugar de la POF. El bloque de inyección se ha construido de forma que sea compatible con el anterior y se pueda cambiar de uno a otro sin apenas modificaciones, lo que ha permitido realizar una comparación de los resultados obtenidos con ambos sistemas de inyección. Por otra parte, se han incorporado elementos al bloque de inyección que permiten realizar un centrado preciso sobre el eje de giro, así como variar el punto de entrada en la POF para poder estudiar su impacto en varios parámetros para fibras con distintos perfiles de índice.

El sistema desarrollado se ha aplicado además a la caracterización del efecto de la presión sobre distintos tipos de fibra de plástico, mediante la obtención de la matriz característica que simula los efectos de una presión a partir de medidas experimentales de barridos angulares de FFP obtenidos antes y después de aplicar dicha presión.





# Índice de contenidos

---

Índice de contenidos.....	1
Índice de figuras y tablas .....	3
Capítulo 1. Introducción .....	7
1.1 Contexto y objetivos del trabajo.....	7
1.2 Contenidos de la memoria.....	9
Capítulo 2. Sistema experimental.....	11
2.1 Descripción del montaje.....	11
2.1.1 Bloque de inyección.....	12
2.1.2 Bloque de registro.....	15
2.2 Comparación de los sistemas de inyección.....	16
Capítulo 3. Estudio de la variación de la distribución angular de potencia a la salida de la fibra con la posición de inyección .....	23
3.1 Procedimiento.....	23
3.2 Resultados .....	26
Capítulo 4. Caracterización de los efectos de la presión sobre POF.....	33
4.1 Sistema de presión .....	33
4.2 Pérdidas de potencia en función de la presión.....	35
4.3 Matriz característica de la presión .....	37
4.3.1 Protocolo experimental.....	37
4.3.2 Modelo matricial de la presión.....	40
4.3.3 Matriz característica promedio .....	43
4.4 Comparación de las predicciones del modelo con medidas experimentales.....	46
Capítulo 5. Conclusiones.....	49
5.1 Aportaciones del TFG y valoración del trabajo.....	49
5.2 Líneas futuras .....	50
Bibliografía y Referencias.....	51
Anexo I. Fibra óptica: estructura, características y clasificación.....	55

I.1 Características geométricas.....	55
I.2 Fenómenos de la fibra óptica: atenuación y dispersión .....	56
I.2.1 Atenuación.....	56
I.2.2 Dispersión .....	57
I.3 Estructura de la fibra óptica .....	57
I.4 Tipos de fibra óptica .....	58
Anexo II. Preparación de la fibra .....	61
Anexo III. Entorno de medidas de FFPs (LabView) .....	63
Anexo IV. Programas desarrollados en el proyecto (Matlab).....	67
Anexo V: Hojas de características .....	69
V.1 Fibra Corning RGB 400 – Monomodo de visible.....	70
V.2 Fibra Eska™ Mitsubishi GH-4001.....	72
V.3 Fibra HFBR-R Avago Technologies.....	74
V.4 Fibra OM-Giga-SE100 FiberFin.....	76
V.5 Cámara QICAM-Fast 1394 de 12 bits.....	77
V.6 Medidor de presión FSR 400 Series.....	79
V.7 Kit Fotec para fibra óptica .....	83

# Índice de figuras y tablas

---

Figura 2.1 Sistema experimental original

Figura 2.2 Bloque de inyección de nuestro sistema experimental

Figura 2.3 Sub-bloque del sistema experimental encargado de la inyección entre la fibra GOF y la POF

Figura 2.4 Bloque de registro del sistema experimental

Figura 2.5 Comparación de las medidas del barrido angular para un tramo de 2.5m de fibra GH-POF en función del modo de inyección

Figura 2.6 Comparación de los perfiles radiales para la fibra GH-POF con ambos sistemas experimentales para  $\theta_{iny} = 0^\circ$  y  $\theta_{iny} = 20^\circ$

Figura 2.7 Comparación de la anchura a media altura con ambos sistemas experimentales

Figura 2.8 Comparación de las medidas del barrido angular para un tramo de 2.5m de fibra GI-POF en función del modo de inyección

Figura 2.9 Comparación de los perfiles radiales para la fibra GI-POF con ambos sistemas experimentales para  $\theta_{iny} = 0^\circ$  y  $\theta_{iny} = 10^\circ$

Figura 2.10 Comparación de la anchura a media altura con ambos sistemas experimentales

Figura 2.11 Comparación de los resultados del barrido angular para la fibra GI-POF con inyección con SMV si la distancia SMV-POF es mínima y 50 micras

Figura 2.12 Comparación de las anchuras a media altura para la fibra GI-POF en función de la separación POF-SMV

Figura 3.1 – Influencia de la preparación de la fibra. a) Barridos de perfiles radiales en función de x (izquierda), b) Posición de los máximos normalizados para cada perfil (derecha)

Figura 3.2 Barridos longitudinales para las distintas fibras POF

Figura 3.3 – Comparación de los parámetros estudiados con y sin pulido para la fibra GH-POF

Figura 3.4 – Comparación de los parámetros estudiados con y sin pulido para la fibra HFBR-POF

Figura 3.5 – Comparación de los parámetros estudiados con y sin pulido para la fibra GI-POF

Figura 3.6 Comparación de los parámetros para las 3 fibras

Figura 3.7 Comparación de los perfiles radiales con  $x=0$  para los 3 tipos de fibras estudiados

Figura 4.1 Fases de montaje del sistema de presión

Figura 4.2 Medidas de la curva característica del medidor de presión

Figura 4.3 Montaje del experimento de cálculo de las pérdidas por presión

Figura 4.4 Pérdida de potencia debido al efecto de la presión para la fibra SI-POF y GI-POF

Figura 4.5 Resultados obtenidos para las fibras SI-POF y GI-POF con y sin presión

Figura 4.6 Comparación de los perfiles radiales antes, durante y tras la presión para  $\theta_{my} = 0^\circ$  y  $\theta_{my} = 20^\circ$

Figura 4.7 Matrices características de la presión para un tramo de fibra SI-POF y GI-POF

Figura 4.8 Resultados obtenidos tras aplicar el modelo matemático a una fibra SI-POF y una GI-POF y error del modelo

Figura 4.9 Diagrama de barras con los parámetros del modelo para cada medida de las fibras SI-POF (arriba) y GI-POF (abajo)

Figura 4.10 Matrices características promedio de la presión de las fibras SI-POF y GI-POF

Figura 4.11 Diagrama de barras de los errores cometidos por cada uno de los modelos matemáticos

Figura 4.12 Resultados tras aplicar el modelo matemático promedio de GH-POF a una medida sin presión de HFBR-POF



Figura 4.13 Pérdida de potencia del efecto de la presión en la fibra SI-POF y GI-POF

Figura I.1 Propagación de la luz en una fibra óptica

Figura I.2 Estructura de una fibra óptica

Figura I.3 Distribución de los núcleos de una fibra de un núcleo (izquierda) y multinúcleo (derecha)

Figura I.4 Propagación de la luz de una fibra SI-POF

Figura I.5 Propagación de la luz en una fibra GI-POF

Figura II.1 Peladora y cortadora para el preparado de una fibra GOF

Figura II.2 Peladora y cortadora para el preparado de una fibra POF

Figura II.3 Lijas utilizadas para el pulido de una fibra POF

Figura II.4 Proceso de pulido de una fibra POF

Figura III.1 Entorno de medidas LabVIEW<sup>TM</sup>

Tabla 3.1 Comparación de la anchura efectiva para un conjunto de medidas de la fibra HFBR-POF

Tabla 4.1. Parámetros fijos del modelo matemático para las fibras SI-POF y GI-POF

Tabla 4.2. Parámetros del modelo matemático y error de una medida para las fibras SI-POF y GI-POF

Tabla 4.3. Parámetros promedio y desviación estándar del modelo matemático para fibras SI-POF y GI-POF



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Contexto y objetivos del trabajo

El trabajo descrito en esta memoria se enmarca en la línea de investigación de fibras ópticas de plástico y aplicaciones desarrollada en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones de la EINA cuya actividad abarca desde el modelado de la fibra y dispositivos [1-3] hasta la aplicación en redes de corto alcance [4-6] pasando por el diseño y desarrollo de sistemas experimentales para caracterización de parámetros importantes en la transmisión [7-9].

Las fibras de plástico (POF) son fibras de un mayor tamaño que las de vidrio (1000 micras de núcleo frente a 9 o 50 micras) que, aunque presentan mayor atenuación (0.2 dB/m en lugar de 0.2dB/km) y menor capacidad, tienen la ventaja de poder utilizarse con componentes y dispositivos baratos por lo que su uso se ha implantado en redes para automóviles y se está extendiendo también en redes dentro del hogar [10]. Un prototipo de red doméstica se encuentra instalado en el Laboratorio de comunicaciones ópticas de la EINA [11]. Actualmente, el grupo de POF está colaborando en un proyecto con investigadores del College of State Island que es una de las sedes del CUNY (College University of New York) para la implantación dentro de aviones de redes de datos basadas en POFs (Plastic Optical Fibers) [12].

Hasta el momento, el grupo se ha centrado en las fibras de plástico de 1 mm de un sólo núcleo, desarrollando un modelo matricial para describir la propagación de la luz que se está actualmente integrando en software comercial para poder simular entornos complejos [13-15]. La matriz característica de la fibra proporciona una descripción completa de las variaciones que sufre la distribución espacio-temporal de potencia óptica al propagarse. Estas matrices se calculan a partir de las funciones angulares de atenuación y difusión que se obtienen a partir de datos experimentales [1]. Las predicciones del modelo matricial se han contrastado con medidas de parámetros de transmisión como por ejemplo el ancho de banda de la fibra [9]. Con esta misma metodología, se han caracterizado algunos componentes, como un scrambler o mezclador de modos [3] y varios tipos de conectores [16] y también perturbaciones como son las curvaturas de pequeños radios [17]. La presencia de estos dispositivos o perturbaciones en distintos puntos de la red modifica la distribución espacial de potencia de la luz lo que tiene un impacto sobre sus propiedades de transmisión. Por ello, resulta indispensable tener un modelo matricial de los mismos incluido en el entorno de simulación que se está desarrollando.

Para la caracterización tanto de fibras como de dispositivos o perturbaciones, la principal herramienta utilizada hasta el momento ha sido un sistema experimental para el registro de patrones de campo lejano (Far Field Patterns, FFPs), que proporcionan una descripción de la potencia que se transmite por la fibra en cada ángulo [7]. En el sistema utilizado hasta el momento, la inyección de luz a la fibra se ha hecho mediante una fuente colimada y muy directiva, un láser de He-Ne, de forma que puede variarse el ángulo entre su haz y la fibra y así obtener el FFP en función del ángulo de inyección. Aunque el haz del láser es muy estrecho, es lo suficientemente ancho como para cubrir toda la superficie de la fibra de forma que no permite una inyección precisa en un punto concreto de la misma. Este tipo de inyección localizada sería aplicable al análisis de la influencia de distintos tipos de inyección e indispensable en el estudio y caracterización de fibras multi-núcleo con las que el grupo de POF está comenzando actualmente a trabajar [18,19].

El objetivo principal de este proyecto se enmarca en la línea de diseño y desarrollo de sistemas de caracterización de propiedades de fibras de plástico [20]. Concretamente, se trata de modificar el sistema de obtención de barridos de patrones de campo lejano para que la inyección se realice mediante una fibra mono-modo de visible, a partir de ahora SMV, en lugar de con un láser de He-Ne. De esta forma, será posible inyectar la luz de forma localizada en un punto de la superficie de la POF. La comparación de los resultados obtenidos con ambos sistemas de inyección permitirá valorar las ventajas e inconvenientes de cada uno así como su aplicabilidad. Además, los resultados obtenidos con este nuevo sistema de inyección combinan información de campo lejano y cercano, y permitirán analizar más a fondo el comportamiento de fibras con distintos perfiles de índice, como son las de salto de índice (SI-POF) y las de índice gradual (GI-POF).

Por otra parte, con el fin de aplicar el nuevo sistema desarrollado en un caso concreto se ha abordado la caracterización de los efectos de una presión sobre la fibra mediante una matriz de forma que pueda ser integrada en el entorno de simulación que está siendo desarrollado por el grupo. Debido a la sencillez de manipulación de las fibras de plástico, es habitual que en las redes domésticas sea el propio usuario el que realiza la instalación de la fibra dentro de su hogar. Esta ventaja puede transformarse en inconveniente si se realiza la sujeción de la fibra mediante algún sistema que ejerce una presión fuerte y localizada sobre ella. Aunque las fibras de plástico presentan mayor robustez ante los agentes externos que las fibras de vidrio, y su mayor módulo de Young (casi dos órdenes de magnitud mayor que el de las fibras de vidrio) garantiza suficiente flexibilidad para soportar las tensiones aplicadas en su instalación sin romperse [21], se ha observado que las fibras sometidas a tensiones sostenidas durante un periodo de tiempo sufren cambios permanentes en sus propiedades [22]. Además, es razonable esperar que, como en el caso de las curvaturas, la presión no sólo produzca



pérdidas sino también transferencia de potencia entre ángulos [17, 23]. En este proyecto nos centraremos en caracterizar una presión representativa, similar a la que se aplica a la fibra para sujetarla al muro mediante una brida o algún sistema de sujeción similar.

## 1.2 Contenidos de la memoria

La memoria de este proyecto se ha estructurado en 5 capítulos complementados por varios anexos. En el capítulo, *Introducción*, se plantean el contexto, motivación y objetivos de la realización de este proyecto, y se presenta la organización de los contenidos de la memoria.

En el segundo capítulo, *Sistema experimental*, se describe el sistema completo desarrollado para la obtención de barridos angulares de campo lejano, enfatizando en el bloque de inyección. Este bloque se ha modificado para hacer posible la inyección localizada en un punto concreto de la superficie del extremo de la fibra de plástico mediante una fibra de vidrio mono-modo de visible, SMV. El bloque incluye los elementos necesarios para realizar un centrado preciso de ambas fibras y se ha realizado de forma flexible para permitir el cambio de sistema de inyección (de láser a fibra y viceversa) con las mínimas modificaciones. En este capítulo, además, se comparan medidas realizadas con ambos sistemas de inyección para los dos tipos de fibras analizados (SI-GOF y GI POF) y se valoran las distintas prestaciones de cada uno.

En el tercer capítulo, *Estudio de la variación de la distribución angular de potencia a la salida de la fibra con la posición de inyección*, se presenta un análisis de la influencia del método de preparación de la fibra en la variabilidad de distintos parámetros extraídos del patrón de campo lejano. Además, se comparan los resultados para fibras de salto de índice y de índice gradual.

En el siguiente capítulo, *Caracterización de los efectos de la presión sobre SI-POF y GI-POF*, se describe el sistema de control de la presión ejercida sobre la fibra inspirado en el estándar [24], se obtiene la variación de las pérdidas de potencia en función de dicha presión y se presenta un protocolo experimental para la obtención de barridos de FFP antes y después de aplicar la presión. Con estos resultados experimentales, se ajustan varios parámetros que describen la matriz característica de una presión de 4 N/mm<sup>2</sup>. Finalmente, las predicciones del modelo se comparan con los resultados experimentales de pérdidas globales de potencia para esa presión.

En el quinto y último capítulo, *Conclusiones*, se exponen las conclusiones sintetizando todo el trabajo realizado, explicando las aportaciones y haciendo una valoración del trabajo realizado. Además, se plantean posibles líneas de trabajo futuras que se han abierto como consecuencia de los resultados de este proyecto.

Asimismo, se adjuntan 5 anexos para ampliar y facilitar la comprensión del proyecto.

En el Anexo I, *Fibra óptica de plástico*, se hace una introducción a las fibras ópticas de plástico, los distintos tipos, una breve descripción de las características geométricas de la fibra utilizada y la definición de algunos parámetros de interés en comunicaciones.

En el Anexo II, *Proceso de preparación de la fibra*, se describen las herramientas utilizadas y el procedimiento seguido en la preparación de los extremos de las fibras tanto de vidrio como de plástico.

En el Anexo III, *Entorno de medida de FFPs (LabVIEW™)*, se describe el interfaz de LabVIEW™ del que se dispone en el laboratorio para la realización de las capturas de barridos del FFP.

En el Anexo IV, *Programas desarrollados en el proyecto (Matlab™)*, se proporciona una breve descripción de los programas de Matlab™ desarrollados específicamente para este proyecto.

En el Anexo V, *Hojas de características*, se incluyen las hojas de características de las fibras e instrumentos empleados en el desarrollo del proyecto.

## Capítulo 2. Sistema experimental

---

En este capítulo se presenta el sistema experimental para la obtención de barridos angulares de patrones de campo lejano (Far Field Patterns, FFP). El patrón de campo lejano es la distribución de la luz en una región relativamente alejada de la fibra. Debido a la simetría de la radiación respecto al eje de la fibra, la proyección de este patrón en un plano tiene simetría circular por lo que basta con representar su perfil en la dimensión radial. El valor del radio se corresponde directamente con el ángulo de salida de la fibra por lo que el perfil radial del patrón de campo lejano representa la cantidad de potencia que se transmite por ella en dicho ángulo y nos aporta información para conocer los mecanismos de la propagación de la luz en la misma.

En este proyecto, se partió de un sistema ya desarrollado basado en inyección con láser de He-Ne modificando este aspecto para poder realizar la inyección de forma localizada. En la primera sección se describe el montaje completo, haciendo hincapié en el bloque de inyección que es el que se ha modificado. En la segunda sección, se comparan medidas de ambos sistemas lo que permitirá interpretar los resultados que se presentan en los siguientes capítulos.

### 2.1 Descripción del montaje

El sistema de medida de patrones de campo lejano de fibras de plástico que se ha utilizado hasta el momento consta de dos bloques, el bloque de inyección y el de registro, que incluye un software de control. Para diseñar nuestro sistema experimental partiremos de dicho montaje pero cambiando el sistema de inyección para poder realizar nuevas aplicaciones. En la Figura 2.1 (arriba) se muestra un esquema de este sistema experimental completo. Abajo (izquierda) se muestra la cámara enfocando a la pantalla, un patrón de campo lejano (centro) y su correspondiente perfil radial (derecha).

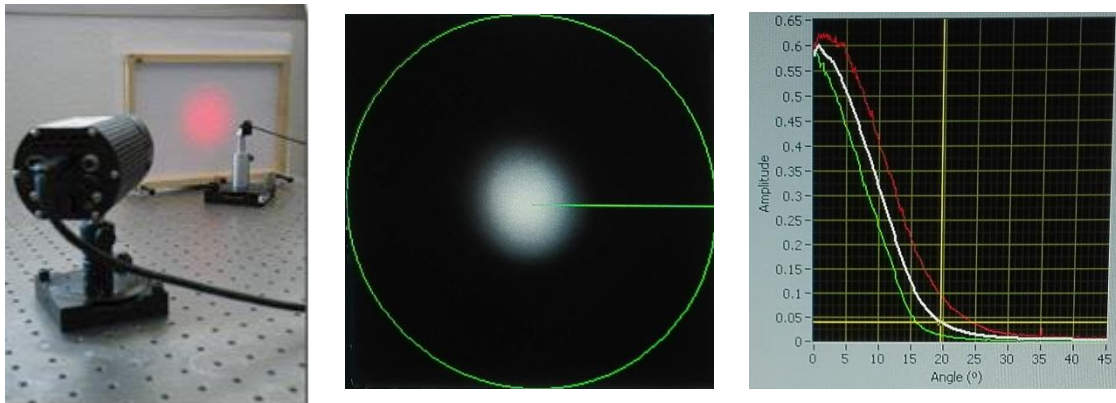
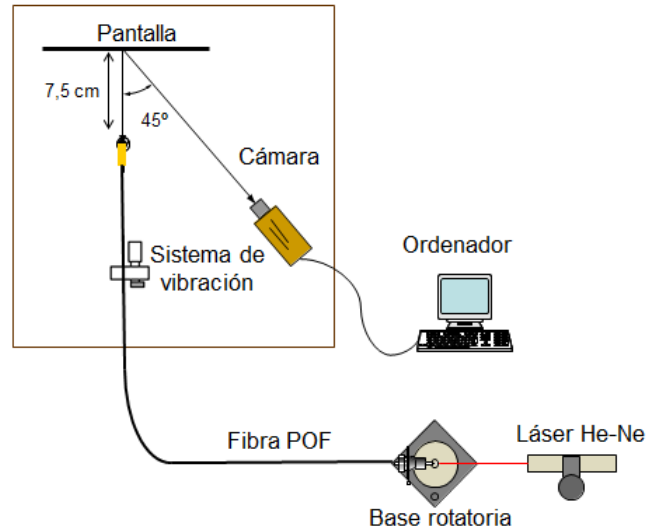


Figura 2.1 Sistema experimental original (arriba) y sistema de captura del perfil radial (abajo)

### 2.1.1 Bloque de inyección

El bloque de inyección utilizado hasta ahora se basa en la inyección directa a la POF mediante un láser He-Ne, que es una fuente de luz muy directiva y colimada. Para cambiar el ángulo de inyección, la POF se sitúa sobre una base rotatoria que está conectada a un motor controlado mediante el software de LabView, descrito en el Anexo III. Con este sistema controlado por ordenador, se realizan barridos angulares del FFP, obteniendo dichos patrones para cada ángulo de inyección.

En la inyección con el láser de He-Ne el haz de luz incide sobre toda la superficie de la fibra por lo que no es posible inyectar la luz de forma precisa y localizada en un punto concreto de la superficie de la misma. Además, al cambiar el ángulo de inyección girando la propia POF, ésta se mueve durante el registro de un barrido completo. Como nuestro objetivo es analizar el comportamiento de la POF, esta variación de su posición puede introducir curvaturas que, aunque de radio relativamente grande, podrían sesgar los resultados en algunos ángulos.



Con la finalidad de inyectar de forma más precisa en un punto concreto de la superficie de la POF que se está analizando, se diseña un sistema de inyección basado en una fibra de tamaño mucho menor que la estudiada. La fibra escogida es una fibra monomodo de visible Corning RGB 400 cuyo diámetro es de 4  $\mu\text{m}$  y su apertura numérica es 0.12. Además, dicha fibra es la que se coloca sobre la superficie rotatoria y es la que se mueve de forma que podemos variar el ángulo de inyección sobre la POF y colocar esta de forma totalmente estirada sin ninguna curvatura que pueda falsear la medida y sin que se mueva durante el barrido angular. Esto nos permitirá además analizar si la fuerte difusión que sufre la luz al entrar en la fibra y que hasta ahora se ha descrito mediante la matriz de inyección sigue estando presente con este nuevo método o es consecuencia de las irregularidades en la superficie de la POF.

La luz que se inyecta proviene de un Láser He-Ne que emite a 635 nm conectado a su correspondiente fuente de alimentación. La luz emitida por este láser se inyecta en uno de los extremos de la SMV añadiendo al montaje un sistema de acoplo XYZ. Además, dado que el diámetro de la fibra a la cual queremos inyectar es del orden de las micras y por tanto mucho menor que el haz de luz del láser será imprescindible que añadamos un objetivo de microscopio para focalizar el haz sobre la fibra. En el otro extremo de la fibra, un medidor de potencia con un display nos muestra el valor de potencia. Este medidor nos ayuda a optimizar el valor de la potencia inyectada en la fibra de vidrio utilizando los tornillos de desplazamiento de los ejes XYZ, asegurando que a la salida de nuestra fibra estudiada la potencia es suficiente antes de enfrentarla a la POF. En la Figura 2.2 se muestra el bloque de inyección que utilizaremos para nuestras medidas

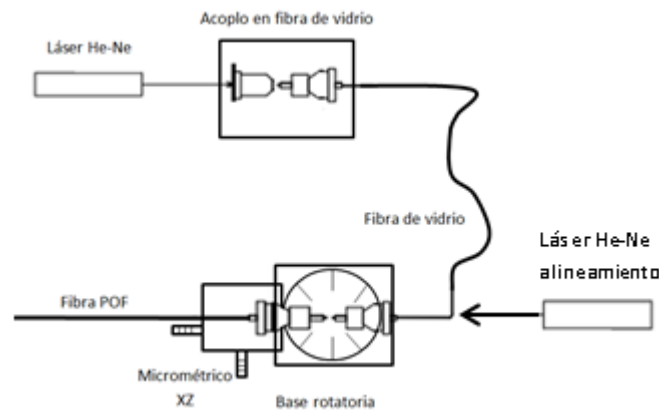


Figura 2.2 Bloque de inyección de nuestro sistema experimental

Las puntas de ambas fibras deben estar perfectamente alineadas y exactamente sobre el centro del soporte rotatorio. Para ello incorporamos a nuestro sistema un micrométrico de precisión XZ (10 micras) sobre el que se coloca la POF en un soporte XYZ. Este elemento dota a nuestro sistema de mayor precisión a la hora de realizar el

centrado, y nos permitirá también estudiar el comportamiento de la fibra en función de la posición longitudinal de inyección. En la Figura 2.3 se muestra en detalle la inyección entre la GOF y la POF. En ella podemos distinguir los elementos explicados anteriormente: micrométrico de precisión XZ, micrométricos XZ, base rotatoria y las dos fibras.

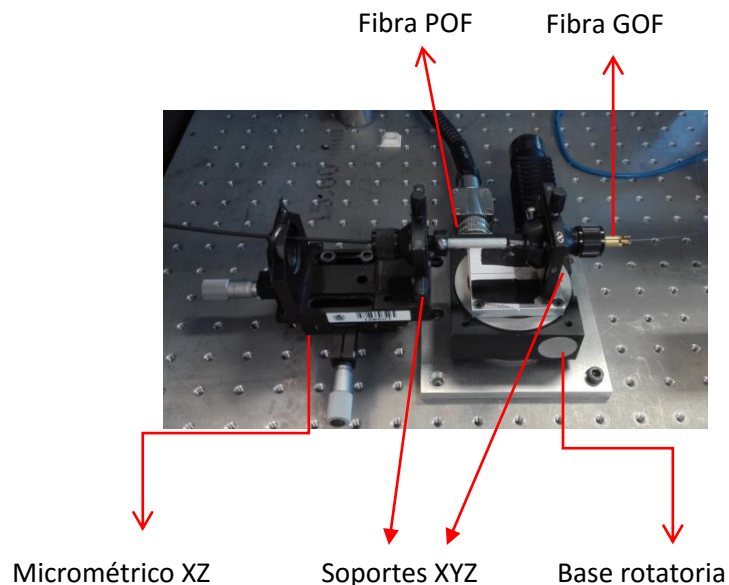


Figura 2.3 Sub-bloque del sistema experimental encargado de la inyección entre la fibra GOF y la POF

Para realizar el alineamiento inicial de los sistemas compuestos por el soporte de sujeción de la fibra de vidrio y el de la POF se ha añadido un segundo láser de He-Ne para usar su haz como referencia (láser He-Ne de alineamiento que se muestra en la Figura 2.2). Este segundo láser ocupa la misma posición que en el montaje del sistema de inyección anterior para que su función no sea sólo optimizar la labor del alineamiento, sino que también permita pasar de un modo sencillo y con escasas modificaciones de inyección con monomodo de visible a inyección directa.

Cuando se realiza una medida se sigue un protocolo de alineamiento para garantizar la correcta posición de ambas fibras. Una vez alineados con ayuda del láser los sistemas de posicionamiento de ambas fibras, se sitúa la fibra de vidrio exactamente en el centro del soporte rotatorio que marca el eje de giro. Para ello, se rota hasta  $90^\circ$  y se centra utilizando el haz de referencia del láser auxiliar. Con el sistema ya alineado, se prepara la POF que se quiere analizar y se coloca después lo más cerca posible de la de vidrio sin que se toquen. Una vez hecho esto, se realiza un barrido en la coordenada horizontal estudiando los valores de los perfiles obtenidos para determinar el centro de la POF. Una vez centrado en horizontal, se hace lo mismo con la vertical. Finalmente, se ajusta el ángulo teniendo en cuenta que la resolución con la que ajustamos es de  $1^\circ$ .

Como ya se mencionó anteriormente, el láser He-Ne de alineamiento de la Figura 2.2 nos permite modificar de forma sencilla y rápida nuestro sistema, para lograr un sistema de inyección como el utilizado en experimentos anteriores, como el de caracterización de curvaturas de pequeño radio [25]. Para ello se elimina del sistema el micrométrico XZ sobre el que se situaba la POF y se rota la base rotatoria 180°. De esta forma colocamos nuestra fibra POF en el soporte XYZ de la base rotatoria Y enfrentada al láser He-Ne, que será el elemento que inyecte la luz y será por tanto la POF, la que gire angularmente para realizar el barrido del ángulo de inyección con el láser de He-Ne fijo.

### 2.1.2 Bloque de registro

El bloque de registro no ha sufrido apenas modificaciones ya que únicamente se añade un elemento de presión junto con un medidor de presión, con el que conseguiremos realizar la caracterización de las distintas POFs frente a la presión. El montaje completo del bloque de registro es el siguiente:

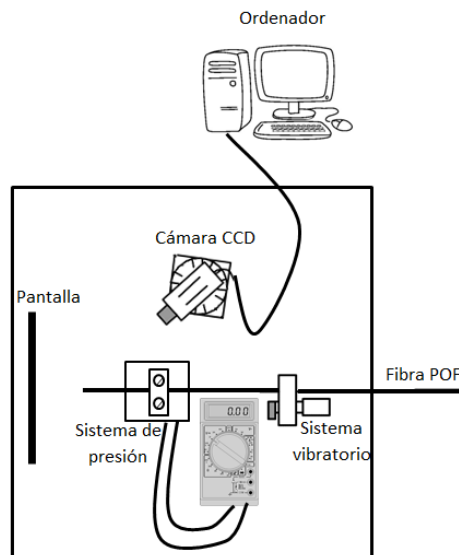


Figura 2.4 Bloque de registro del sistema experimental

El bloque cuenta con subsistema de toma de imágenes que consta de una pantalla reflectora y de una cámara refrigerada monocromática.

La pantalla no tiene por qué cumplir unas características concretas, pero si nos tiene que permitir una reflexión limpia del patrón de luz emitido por nuestra fibra, por lo que simplemente colocaremos como pantalla una cartulina de formato DIN A4. En cuanto a la cámara refrigerada monocromática utilizaremos el modelo “Qicam Fast 1394” de 12 bits que conectaremos a un ordenador que, además de tomar las imágenes, servirá de fuente de alimentación tanto para la cámara como para el “cooler”.

Para la correcta toma de imágenes la cámara refrigerada deberá colocarse con una cierta inclinación con respecto a la fibra POF, que en nuestro caso tomará el valor de  $45^\circ$ . Tanto este valor de inclinación como la distancia entre el extremo de la POF y la pantalla se le especificarán al software de captación de imágenes, para que realice las correspondientes correcciones en la imagen tomada. Una de las que deberá hacer es la corrección espacial correspondiente a la inclinación de  $45^\circ$  desde la cual tomamos la imagen. El entorno de LabView ya posee una herramienta que elimina la distorsión espacial en tiempo real mediante la toma de una imagen de referencia, que funciona como plantilla para poder corregir esa distorsión y calibrar la imagen.

En cuanto a la distancia, la única restricción que se hace es que la distancia entre el extremo de la fibra y la pantalla sea mucho mayor que el diámetro de la fibra, para que la medida realizada sea realmente la del campo lejano por lo que tomaremos una distancia del orden de los centímetros, concretamente 7.5 cm que es suficiente frente a la fibra de 1mm de diámetro.

Otro de los elementos que incluimos en el bloque de registro es un sistema vibratorio basado en un motor de móvil. Debido a que estamos usando un láser como fuente, las imágenes poseen un elevado grado de variabilidad cuyo origen es el ruido de “speckle”, que está presente incluso después de propagarse por la fibra de vidrio. La manera de reducir sus efectos es promediar distintas realizaciones del mismo lo que se consigue mediante la vibración producida por el motor [16, 25]. El sistema está en contacto con una placa a la que está sujeta la fibra y le transmite pequeñas vibraciones mecánicas, que, al registrar las imágenes promediando durante el tiempo de exposición, permite obtener unos perfiles radiales más suaves y con menos ruido.

Tras dicho elemento de vibración incluimos un elemento de presión que se incorporará al sistema experimental, cerca del extremo final de la fibra junto con su correspondiente medidor en los experimentos de caracterización del comportamiento de la fibra frente a la presión, descritos en el Capítulo 4.

## **2.2 Comparación de los sistemas de inyección**

Para analizar el comportamiento de este nuevo sistema y poner de manifiesto sus ventajas e inconvenientes, se comparan medidas de barridos angulares de campo lejano obtenidos con ambos métodos de inyección. Como hemos dicho, se ha realizado un montaje experimental que permite cambiar de sistema de inyección con relativa facilidad. Por ello, se han tomado medidas de las mismas fibras utilizando ambos sistemas.

Las fibras elegidas han sido las que posteriormente se utilizaran en los demás experimentos y son ambas del mismo material polimetilmetacrilato (PMMA) y 1 mm de diámetro. Una de ellas tiene un perfil de salto de índice de refracción (es decir, el material del núcleo tiene un valor fijo de índice de refracción) y la otra tiene un perfil de índice gradual, que cambia de forma aproximadamente parabólica a lo largo de la dirección radial del núcleo. Hay que decir que, a diferencia de lo que ocurre en las fibras de vidrio, en las POFs el núcleo tiene casi el tamaño de la fibra completa ya que la cubierta, con índice de refracción menor, es una capa muy delgada. La fibra de salto de índice SI-POF es la GH4001 de Mitsubishi, a la que desde ahora nos referiremos como GH-POF. La fibra de índice gradual es la OMGIGA de Optimedia Inc., y nos referiremos a ella como GI-POF.

Por ello, tras preparar los extremos de las fibras como se indica en el Anexo II y con las herramientas idóneas determinadas en [18,26,27] se realiza el barrido angular del FFP variando el ángulo de inyección desde  $-40^\circ$  hasta  $40^\circ$ , de grado en grado y registrando la imagen reflejada en la pantalla para cada ángulo. En esta imagen corregida se busca el centroide a partir del cual se extrae el perfil radial correspondiente como se muestra en el Anexo III. El perfil radial extraído de la imagen del FFP registrada para cada ángulo de inyección representa la potencia en función del ángulo de salida que va de  $0^\circ$  a  $45^\circ$ . Una vez extraídos todos los perfiles radiales los ordenamos en una matriz de potencias para facilitar su representación en una imagen.

En la Figura 2.5 se muestran de esta forma las medidas para un mismo tramo de 2.5 metros de fibra GH-POF utilizando inyección directa con láser de He-Ne (izquierda) y a través de SMV (derecha). Las imágenes muestran los niveles de potencia con una paleta de colores del rojo al azul, siendo los colores cálidos los correspondientes a los niveles más altos, y los fríos a los más bajos. Cada columna representa el perfil radial para un ángulo de entrada o de inyección (eje horizontal) en función del ángulo de salida (eje vertical) que corresponde a los ángulos de propagación de la luz en la fibra. Para una mejor visualización se simetrizan las figuras respecto al eje horizontal por lo que la parte superior de la imagen es una réplica de la inferior. El hecho de que las medidas para ángulos de inyección positivos y negativos no sean idénticas (no hay simetría respecto al eje vertical) permite apreciar la desviación respecto a la respuesta simétrica ideal.

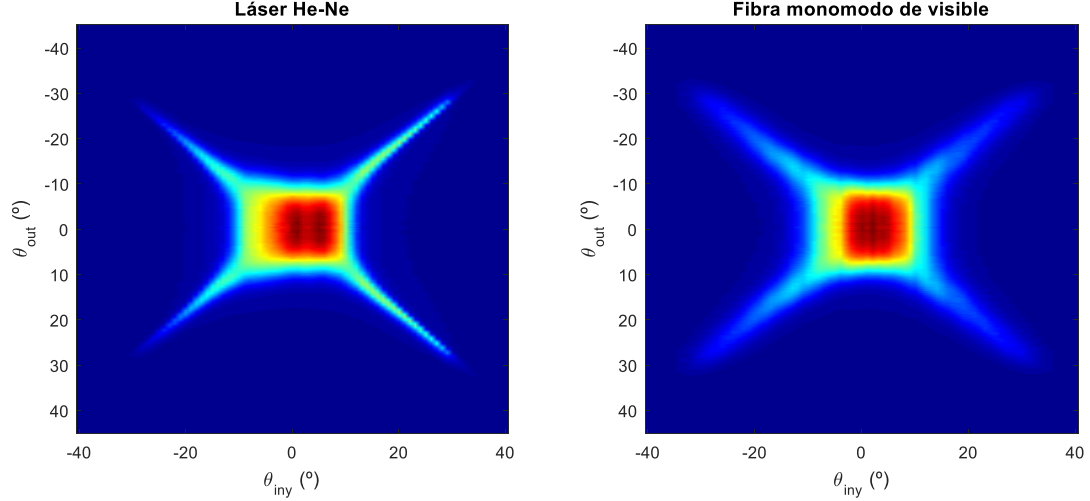


Figura 2.5 Comparación de las medidas del barrido angular para un tramo de 2.5m de fibra GH-POF en función del modo de inyección

En fibras de salto de índice, el patrón de campo lejano tiene forma de disco para ángulos bajos y va cambiando al aumentar el ángulo de inyección hasta formar un anillo en los ángulos más altos. El ángulo del anillo corresponde aproximadamente al ángulo de inyección. Por ello, se ve una zona central cuadrada y que corresponde a ángulos de inyección bajos con FFP en forma de disco y unas aspas para los ángulos altos donde el patrón tiene forma de anillo. Comparando ambas imágenes de la Figura 2.5 puede apreciarse que son muy similares, y que las asimetrías entre ángulos positivos y negativos se mantienen con ambas formas de inyección. La explicación de dichas asimetrías reside posiblemente en que la superficie tras el pulido no es exactamente perpendicular al eje de la fibra sino que tiene un ángulo remanente. Sin embargo, las aspas son algo más anchas con inyección por fibra de vidrio lo que sugiere que el anillo del FFP es más ancho. Para confirmar este efecto, en la Figura 2.6 se representan los perfiles radiales para  $0^\circ$  a la izquierda y para  $20^\circ$  a la derecha con ambos métodos de inyección. Debido a que la potencia que emite el láser He-Ne es mucho mayor que la potencia de salida de la SMV y se ha tenido que cambiar el tiempo de exposición, cada una de las medidas se normaliza al máximo de la misma, para poder comparar mejor los perfiles extraídos de estas medidas.

La figura muestra que, aunque los perfiles para  $0^\circ$  son prácticamente idénticos, para  $20^\circ$  el perfil obtenido inyectando con láser es más alto y más estrecho y su máximo está centrado con mayor precisión en el ángulo de inyección.

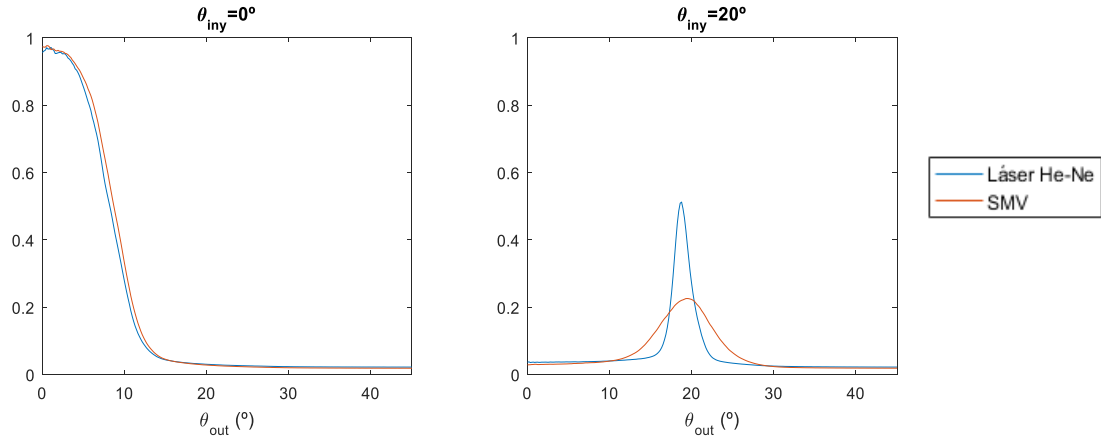


Figura 2.6 Comparación de los perfiles radiales de la fibra GH-POF con ambos sistemas experimentales para  $\theta_{iny} = 0^\circ$  y  $\theta_{iny} = 20^\circ$

En la Figura 2.7 se representa la anchura total a media altura para todos los perfiles radiales con ambos sistemas de inyección tanto para la zona del núcleo como en la zona de los anillos. En ambos casos la anchura aumenta conforme nos alejamos de la posición  $\theta_{iny} = 0^\circ$  hasta llegar a la zona de los anillos en la que la anchura tiene tendencia constante y de un valor muy inferior al de la zona central. Además se comprueba que en la medida inyectando con fibra de vidrio la anchura a media altura es mayor para todo el margen de ángulos de inyección que en el caso de inyectar con el láser He-Ne ( $16.85^\circ$  en el caso de inyectar con el láser He-Ne y  $17.55^\circ$  en el caso de inyectar con SMV). Esto podría justificarse por su mayor apertura ( $1.2$  corresponde a ángulos de  $7^\circ$ ) frente al láser que es del orden de  $1^\circ$ .

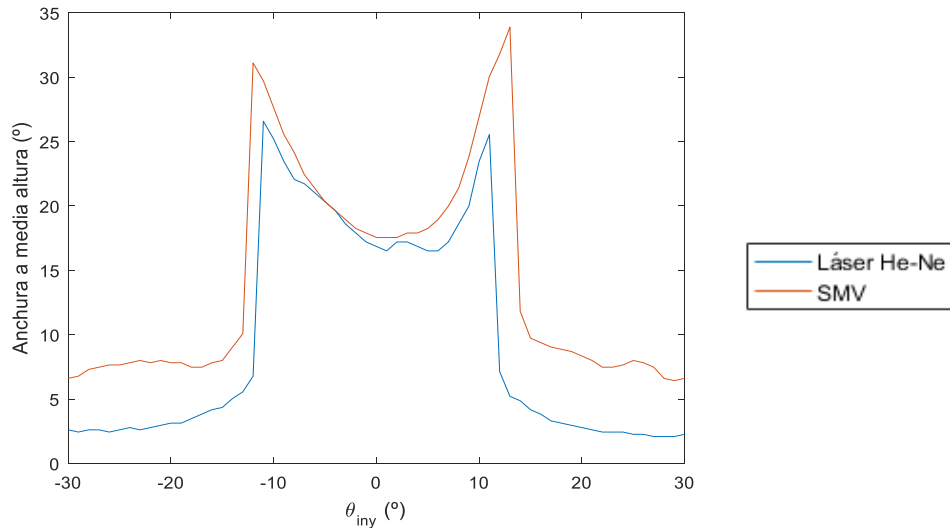


Figura 2.7 Comparación de la anchura a media altura con ambos sistemas experimentales

Al igual que hemos realizado el estudio del comportamiento de la fibra GH-POF dependiendo del sistema de inyección se realiza el estudio en el caso de la fibra GI-POF. En la Figura 2.8 se muestran las medidas para un mismo tramo de 2.5 metros de fibra GI-POF utilizando inyección directa con láser de He-Ne (izquierda) y a través de SMV (derecha).

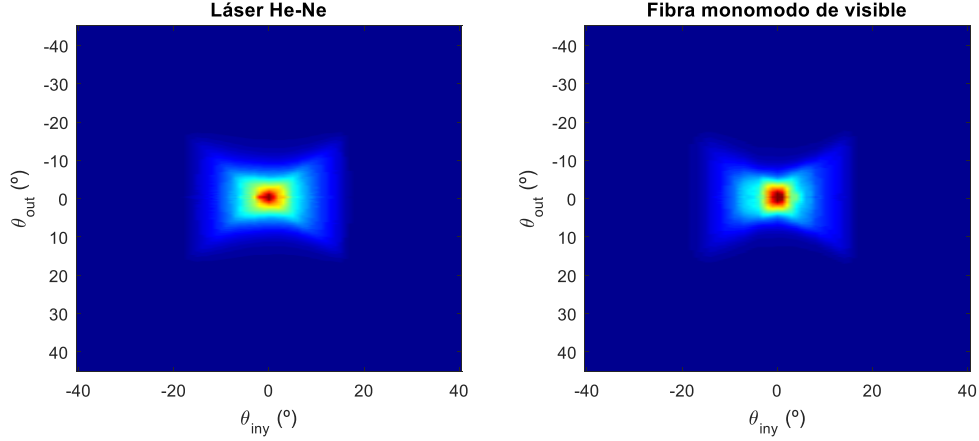


Figura 2.8 Comparación de las medidas del barrido angular para un tramo de 2.5m de fibra GI-POF en función del modo de inyección

Al contrario que lo que sucedía en el caso de la fibra GH-POF las fibras de índice gradual no tienen anillos en los ángulos altos debido a su perfil de índice gradual. Mediante ambos modos de inyección el resultado obtenido es prácticamente idéntico tanto en la distribución de la potencia como en la anchura de ambas medidas. Para corroborar este hecho en la Figura 2.9 se representan los perfiles radiales para  $0^\circ$  (izquierda) y para  $10^\circ$  (derecha) con ambos métodos de inyección, donde cada una de las medidas se normaliza al máximo de la misma. Comprobamos que los perfiles son prácticamente iguales en ambos ángulos de inyección.

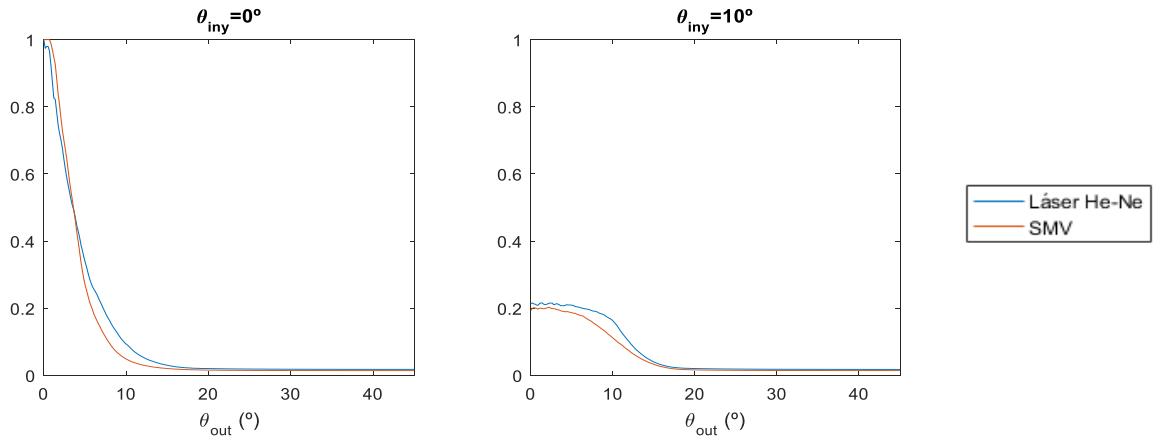


Figura 2.9 Comparación de los perfiles radiales de la fibra GI-POF con ambos sistemas experimentales para  $\theta_{iny} = 0^\circ$  y  $\theta_{iny} = 10^\circ$



En la Figura 2.10 se representa la anchura total a media altura para todos los perfiles radiales con ambos sistemas de inyección exclusivamente en la zona del núcleo. Al igual que en la fibra GH-POF la anchura aumenta conforme nos alejamos de la posición  $\theta_{iny} = 0^\circ$ , presentando el mismo comportamiento y prácticamente los mismos valores para ambos métodos de inyección. En el caso de la inyección con el láser He-Ne la anchura es de  $3.65^\circ$  y en el caso de inyección con la SMV la anchura es de  $3.5^\circ$ .

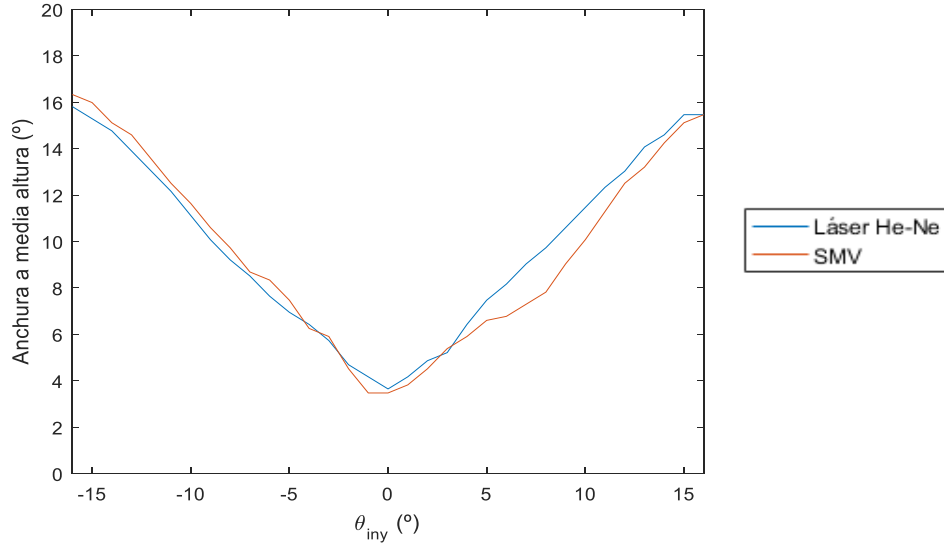


Figura 2.10 Comparación de la anchura a media altura con ambos sistemas experimentales

En la Figura 2.10 se muestra con una línea roja la anchura si inyectamos con la fibra SMV y con una separación entre la fibra GI-POF y la SMV mínima para que el barrido angular se realice correctamente sin que las fibras se toquen.

Para estudiar cómo afecta la distancia entre la fibra test y la SMV a los patrones obtenidos, se ha variado ésta, se han obtenido barridos de FFP para distintas separaciones entre fibras. En el caso de la GH-POF se ha comprobado que la anchura a media altura al inyectar con la SMV no depende de dicha separación. En el caso de GI-POF, sin embargo, el aumento de la anchura es proporcional a la separación entre las fibras. En la Figura 2.11 se muestra la matriz del barrido angular para el caso de la GI-POF con inyección con SMV para 10 micras y para 50 micras. Ambas matrices muestran como la anchura del patrón aumenta al aumentar la distancia entre las fibras.

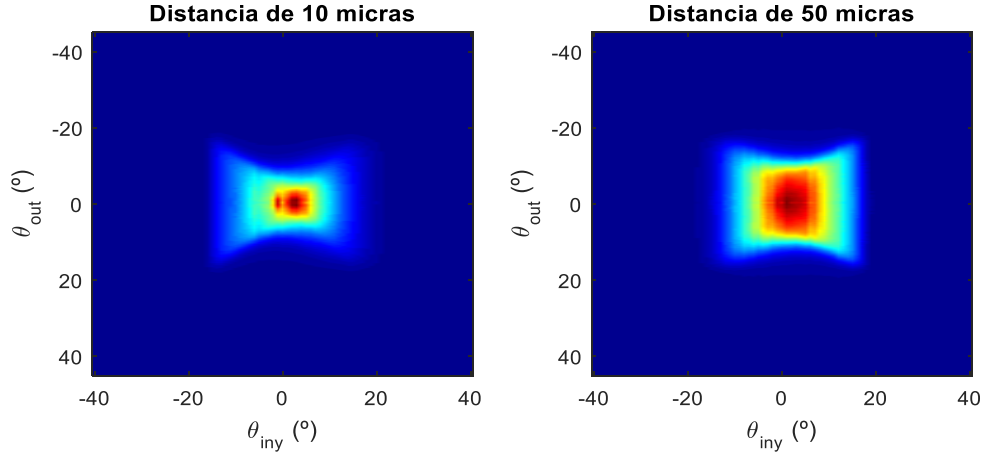


Figura 2.11 Comparación de los resultados del barrido angular para GI-POF con inyección con SMV si la distancia SMV-POF es de 10 y 50 micras

En la Figura 2.12 podemos cuantificar como aumenta esta anchura conforme aumentamos la distancia. En el caso de la inyección con la SMV la anchura ya hemos visto que, para  $0^\circ$ , es de  $3.5^\circ$  si la separación era mínima y alcanza un valor de  $9.38^\circ$  si la distancia es de 50 micras.

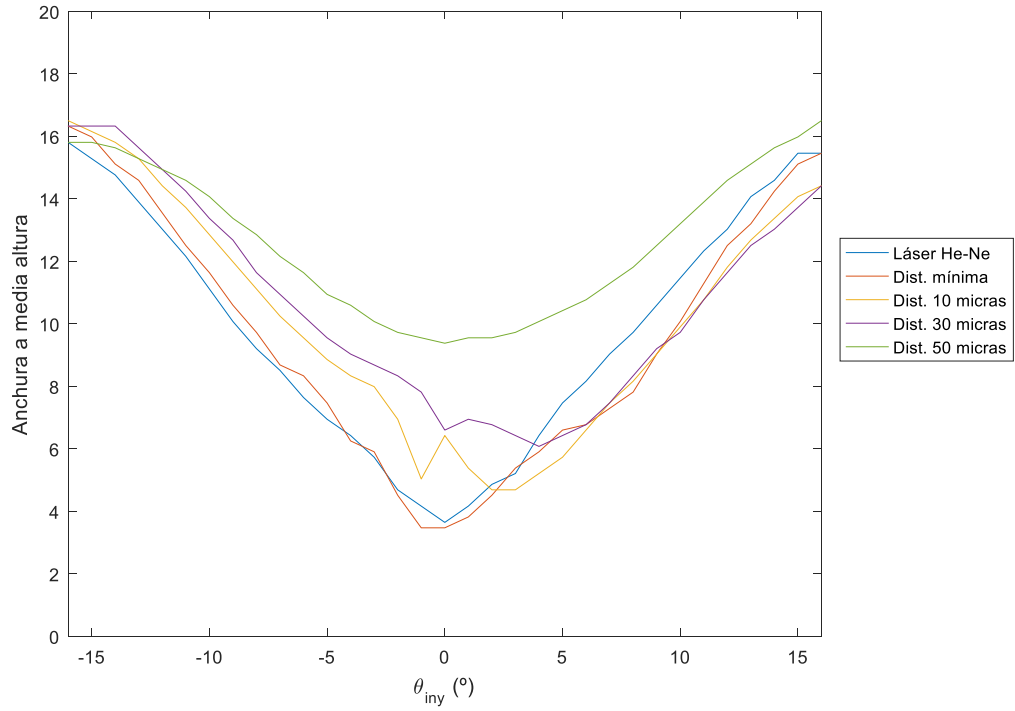


Figura 2.12 Comparación de las anchuras a media altura para la fibra GI-POF en función de la separación POF-SMV

# Capítulo 3. Estudio de la variación de la distribución angular de potencia a la salida de la fibra con la posición de inyección

---

El sistema de posicionamiento instalado para realizar con precisión el centrado de la POF en el sistema descrito en el capítulo anterior se ha utilizado además para determinar la influencia del punto de inyección en el perfil del FFP analizando las diferencias en la distribución de potencia (valor del máximo, anchura, etc.) cuando se inyecta en distintas posiciones de la coordenada radial. Para ello, se han realizado barridos en la dirección horizontal, cambiando dicha posición manualmente, registrando el FFP y obteniendo su perfil radial en cada posición como se indicó en el capítulo de métodos experimentales.

Concretamente, se ha valorado el impacto de la preparación en el perfil de campo lejano y su variabilidad siguiendo un procedimiento descrito en el apartado 3.1. En el apartado 3.2 se presentan los resultados obtenidos para 2 fibras de salto de índice y una de índice gradual del mismo tamaño (1mm) y material (PMMA). La fibra de índice gradual y una de las de salto de índice son las ya analizadas en el capítulo anterior. La segunda fibra de salto de índice es la HFBR-R de Avago que llamaremos HFBR-POF desde ahora. Los resultados obtenidos en este capítulo nos permitirán extraer conclusiones tanto de cómo se comporta cada fibra individualmente como de las diferencias que existen entre ellas.

## 3.1 Procedimiento

Utilizando el micrométrico XZ del montaje que nos permite desplazar el extremo de la POF enfrente a la GOF con una precisión de 10 micras, se obtiene un registro del FFP en función de la coordenada radial de la fibra en la dirección x, perpendicular al eje de la misma.

Anteriormente hemos visto que se ha elaborado un protocolo de centrado del extremo de la POF con respecto a la fibra de vidrio. A diferencia de los barridos angulares, el centrado correspondiente al eje x no es necesario previamente a estas medidas ya que al realizar este barrido recorreremos el diámetro de la fibra en la dirección de desplazamiento del eje x y por tanto todas y cada una de las posibles posiciones de inyección estarán representadas. A pesar de ello antes de realizar cada

uno de los barridos se realizará un centrado aproximado, dejando el centrado más fino para el procesado de las medidas.

Para analizar el impacto del método de preparación de la fibra en los resultados obtenidos se ha seguido el siguiente protocolo para cada uno de los segmentos de POF que vamos a analizar:

- 1) Cortamos el extremo que vamos a enfrentar a la SMV y realizamos un preparado sin pulido, únicamente corte con la cortadora y pelado. Una vez hecho esto se obtiene un barrido de los FFPs en función de  $x$  de 50 en 50 micras. Durante todo el barrido se mantiene el mismo tiempo de exposición.
- 2) Una vez obtenidas estas medidas, retiramos el extremo enfrentado a la fibra de vidrio y realizamos un proceso de pulido completo como se ha explicado en el Anexo 2, centramos y obtenemos un nuevo barrido. Para cada barrido, se fija el tiempo de exposición que permite obtener mejores imágenes. Esta medida nos permitirá valorar la importancia del pulido.
- 3) Con el fin de estudiar también la variabilidad del proceso de preparación para un mismo segmento de fibra tras el corte y/o el pulido volvemos a cortar, pelar y centrar el extremo enfrentado a la GOF y obtenemos un nuevo barrido.
- 4) Por último, repetimos el proceso de pulido, recentramos y medimos de nuevo.

Como ejemplo del procedimiento se presenta una de estas series de 4 medidas obtenidas con una fibra HFBR-POF de 1.25 metros. Cada imagen consta de los perfiles radiales ordenados por columnas. En el eje horizontal representa la posición horizontal  $x$  en micras en la cual se ha inyectado luz utilizando la SMV. Las imágenes están normalizadas al máximo de las 4 teniendo en cuenta los tiempos de exposición utilizados en cada barrido. En la representación de estas medidas se ha realizado un centrado más fino de cada uno de los barridos realizados. Para ello, no se ha tomado la posición del FFP con el máximo de potencia como el centro de la medida sino la posición intermedia entre aquellos dos puntos en los cuales la potencia ha caído a una cuarta parte del máximo.

Para poder valorar la homogeneidad de los resultados y comparar las distintas medidas, a la derecha de cada una de ellas se muestra un gráfico en el que se representa el valor del máximo de cada posición de inyección normalizado al máximo de todos los barridos mostrados.

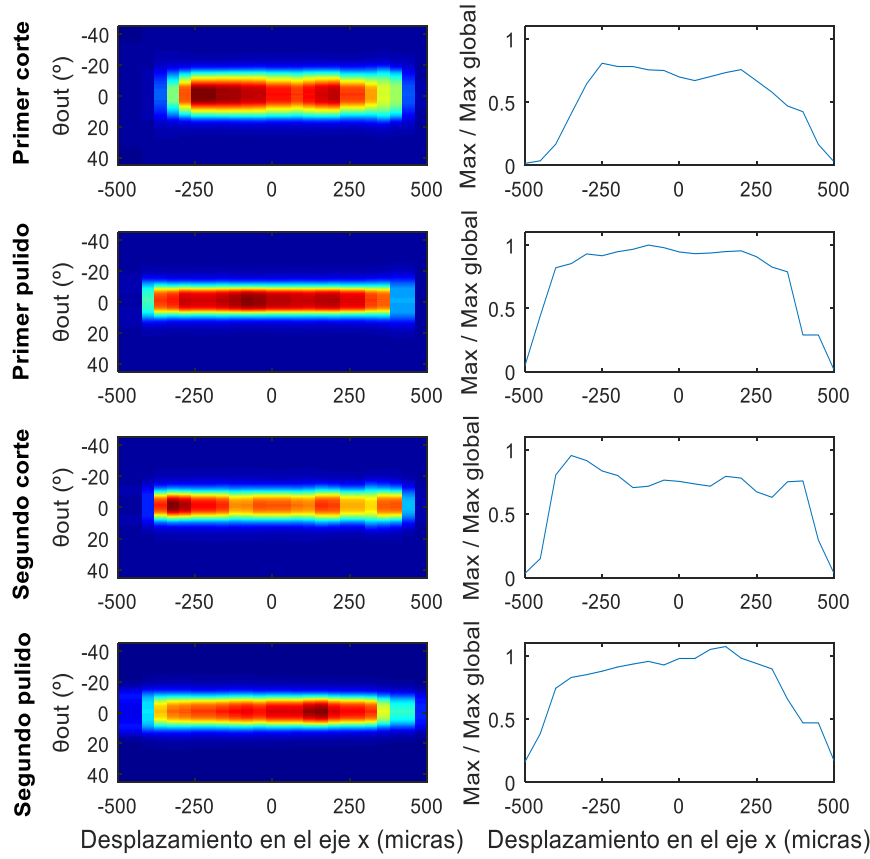


Figura 3.1 – Influencia de la preparación de la fibra. a) Barridos de perfiles radiales en función de  $x$  (izquierda), b) Posición de los máximos normalizados para cada perfil (derecha)

Los resultados de las imágenes de la Figura 3.1 muestran que tras el pulido el patrón de potencia a la salida presenta menor variación en función de la posición que tras sólo el corte, como es razonable esperar. Con el pulido se eliminan imperfecciones en la superficie de la fibra que se hace más uniforme lo que hace que al inyectar por distintas posiciones tengamos resultados más similares. Esto se puede verificar en la representación del valor de los máximos en la parte derecha donde se ve una mayor homogeneidad tras el pulido ya que la mayor parte de los FFPs del barrido alcanzan un valor muy cercano al máximo.

También se observa en las imágenes que cuando la superficie de la fibra está pulida es posible inyectar luz en posiciones más alejadas del centro. Para cuantificar este efecto en las imágenes de la Figura 3.1, consideramos la anchura efectiva como la longitud del intervalo entre las dos posiciones horizontales en las cuales el máximo del perfil cae a la mitad., Este valor también será mayor tras el proceso de pulido, como demuestran los valores de la tabla correspondientes al caso representado en la Figura 3.1:

Medida	Anchura (micras)
Primer corte	800
Primer pulido	940
Segundo corte	900
Segundo pulido	955

Tabla 3.1 Comparación de la anchura efectiva para un conjunto de medidas de la fibra HFBR-POF

Al tratarse de un procedimiento totalmente experimental los resultados presentan una alta variabilidad de una medida a otra incluso para el mismo segmento de fibra. Todas las medidas presentan cierta variabilidad pero es notable que esta disminuye enormemente en las medidas tras el procedimiento de pulido, lo que nos permite extraer la conclusión de que la variabilidad de las medidas depende en gran medida del proceso de corte y pelado de la fibra que se va a medir [18].

## 3.2 Resultados

Aplicando el procedimiento anterior se han analizado 3 fibras diferentes, dos de índice de salto y una de índice gradual. A partir de estas medidas se han obtenido distintos parámetros y se han realizado los promedios de los mismos, calculando su desviación estándar para poder cuantificar la variabilidad de las distintas medidas. Los promedios de cada uno de los parámetros para cada una de las fibras nos permitirán compararlas entre sí y extraer las correspondientes conclusiones.

En la Figura 3.2 se muestra un barrido longitudinal de cada una de las POF que vamos a estudiar. Podemos apreciar que el comportamiento de las fibras SI-POF será distinto del que tiene la fibra GI-POF.

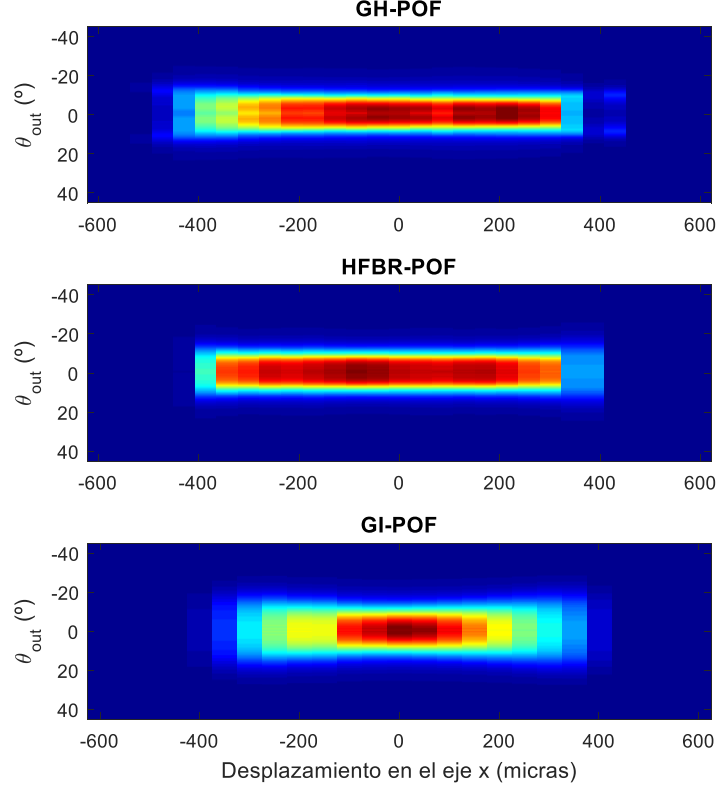


Figura 3.2 Barridos longitudinales para las distintas fibras POF

Las imágenes muestran que las fibras de salto de índice tienen ambas un comportamiento similar y que la distribución de potencia a su salida es prácticamente independiente del punto de inyección. Sin embargo, la fibra GI-POF se comporta de diferente forma dependiendo de la posición de inyección mostrando una mayor potencia en el centro que decrece conforme nos alejamos del mismo. Este comportamiento está claramente ligado al perfil de índice de la fibra. Para cuantificar mejor las diferencias entre fibras, además del valor del máximo en función de  $x$  que se muestra en la Figura 3.1 se ha estimado también tanto la anchura de cada uno de los perfiles radiales y la potencia total del patrón de campo lejano, todos ellos en función de la posición de inyección ( $x$ ).

Esta potencia total de cada uno de los perfiles radiales se calcula de la siguiente forma:

$$Potencia = \sum_k P_k * sen(k\Delta\theta) * \Delta\theta$$

Donde  $\Delta\theta = 0.1737^\circ$  es el espaciado angular del perfil radial dado por la geometría del bloque de inyección (posición y resolución de la cámara y distancia fibra-pantalla).

En las Figuras 3.3-3.5 se muestran los valores obtenidos en medidas individuales para las fibras GH-POF, HFBR-POF y GI-POF. Cada una de las figuras representa una serie de medidas como la descrita en el apartado anterior. De arriba a abajo representamos el valor del máximo en unidades relativas (normalizadas al máximo de cada gráfica), la anchura del perfil radial del FFP a media altura en grados y la potencia en unidades relativas al máximo también de cada gráfica. Además para cada parámetro se añade su promedio y su desviación estándar, la cual se representa a través de barras de error en puntos clave de la representación. Con el fin de seguir comparando el comportamiento respecto al método de preparación representamos en la columna izquierda las figuras correspondientes a las medidas obtenidas tras el corte y en la derecha las realizadas tras el pulido. En cuanto a la leyenda representamos en color azul los parámetros correspondientes al primer corte/pulido, en color rojo los correspondientes al segundo y en color verde el promedio de ambos.

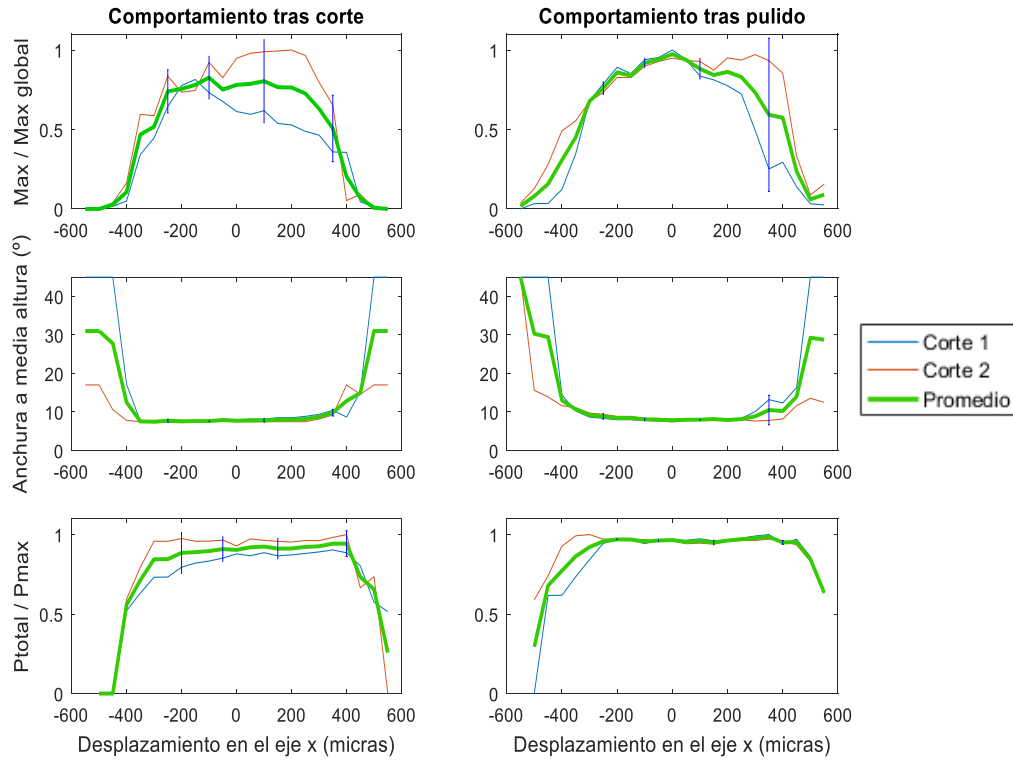


Figura 3.3 – Comparación de los parámetros estudiados con y sin pulido para la fibra GH-POF



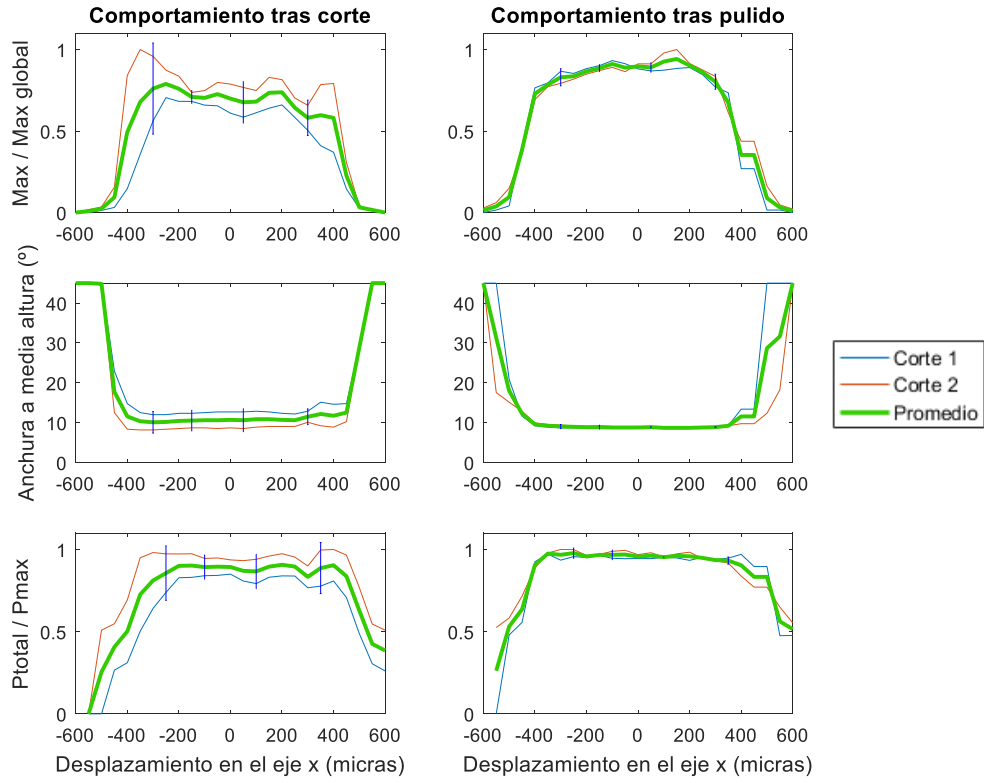


Figura 3.4 – Comparación de los parámetros estudiados con y sin pulido para la fibra HFBR-POF

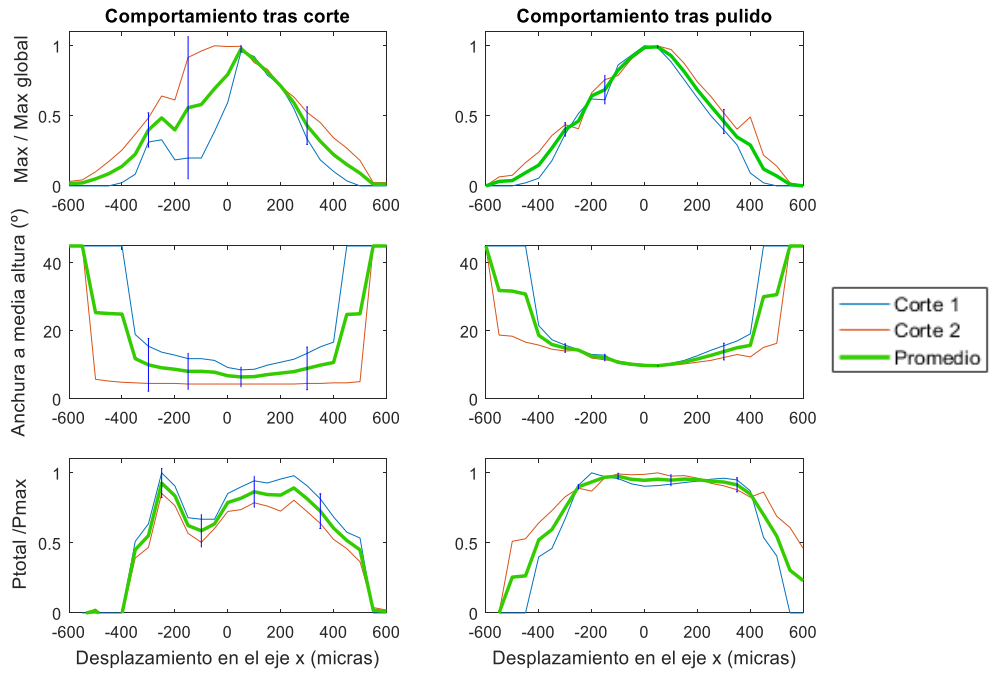


Figura 3.5 – Comparación de los parámetros estudiados con y sin pulido para la fibra GI-POF

En las Figuras 3.3-3.5, podemos apreciar claramente el efecto positivo del pulido. Dicho pulido ha hecho disminuir la variabilidad que existía en los valores del máximo, en la anchura del perfil radial y también en la potencia inyectada en la fibra. Además podemos comprobar que tras el pulido la potencia inyectada es más uniforme a lo largo de la dirección radial. En cuanto a la anchura el proceso de pulido no la ha modificado en media pero sí que ha disminuido su variabilidad.

Por otra parte, este tipo de medida nos permite ver claras diferencias entre las fibras de salto de índice y la de índice gradual.

Con el objetivo de poder observar mejor las diferencias entre fibras se incluye la Figura 3.6 en la cual mostramos el comportamiento promedio de las 3 fibras estudiadas tras el pulido. De arriba abajo representamos el valor del máximo en unidades relativas, la anchura a media altura en grados y la potencia en unidades relativas al máximo.

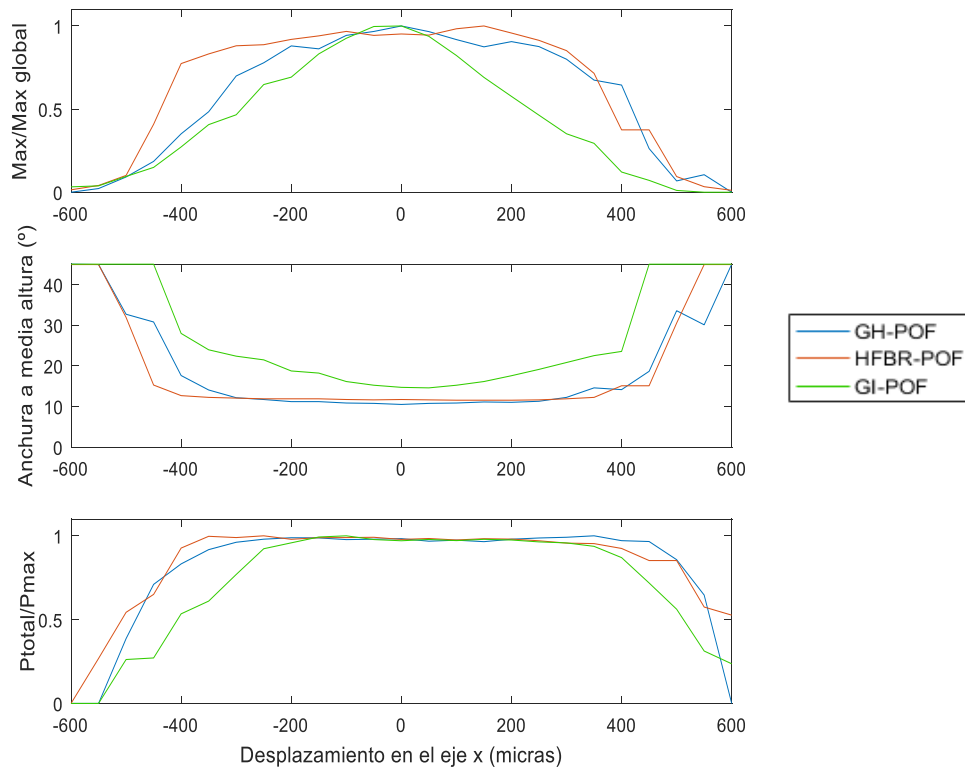


Figura 3.6 Comparación de los parámetros para las 3 fibras

Si comparamos los resultados mostrados en las gráficas anteriores vemos que las fibras SI-POF tienen un comportamiento muy similar. La anchura efectiva dentro de la cual podemos considerar que estamos inyectando luz a la fibra tiene un valor de 800 micras para ambas fibras. Además, dentro de esa anchura, los máximos toman valores bastante uniformes, como también lo hace la anchura del perfil radial del FFP.

Sin embargo, los resultados obtenidos para la GI-POF son muy diferentes de los obtenidos para ambas SI-POFs. En el parámetro que mejor observamos esto es los valores de los máximos. Mientras que las SI-POF tienen un comportamiento uniforme dentro de la anchura efectiva en el que la fibra está transmitiendo luz, la GI-POF tiene una mayor variación, de tipo Gaussiano con un máximo en el centro y decreciendo hacia los extremos. Obviamente este comportamiento está relacionado con el perfil de índice de refracción del núcleo, el cual tiene una variación gradual. Esta variación hace que dependiendo de en qué punto del núcleo inyectemos el perfil obtenido a la salida de la fibra sea distinto. Al alejarnos del centro el valor del índice de refracción disminuye por lo que la apertura numérica también disminuye y por tanto el ángulo aceptación también disminuye. Esto provoca que al inyectar en una posición alejada del núcleo haya rayos del haz del láser que superen dicho ángulo y no contribuyan a la salida.

También se observan diferencias para fibras de distintos perfiles de índice en tanto en la anchura de los perfiles radiales como en su variación con la posición de inyección. En las fibras de salto de índice la anchura es muy similar:  $10.2^\circ$  (GH-POF) y  $12.1^\circ$  (HFBR-POF) para inyección en el centro ( $x=0$ ), con muy poca variación: (desviación típica máxima de 0.77) y en 300 micras su valor aumenta solo un 10,4%. En el caso de la fibra de índice gradual la anchura es mayor en el centro:  $14.7^\circ$  y aumenta en los extremos un 52% siguiendo aproximadamente la forma del perfil de la fibra.

Ya hemos analizado la mayor anchura a media altura de las distribuciones angulares de potencia para fibras de gradiente índice. Este comportamiento se ilustra en la Figura 3.7 donde se muestran los perfiles radiales de los 3 tipos de fibra para la posición longitudinal  $x=0$ . La distribución de potencia en la GI-POF es más ancha que para las SI-POF, que presentan distribuciones es similares.

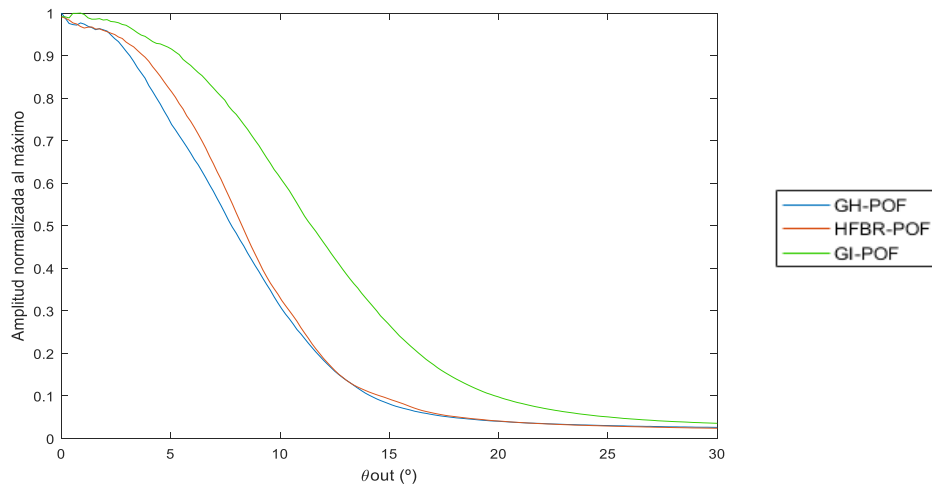


Figura 3.7 Comparación de los perfiles radiales con  $x=0$  para los 3 tipos de fibras estudiados



# Capítulo 4. Caracterización de los efectos de la presión sobre POF

En este capítulo se describe la metodología utilizada para caracterizar los efectos de la aplicación de presión en fibras de plástico con distintos perfiles de índice.

El capítulo se organiza de la siguiente forma: en primer lugar, se describe y caracteriza el sensor de presión utilizado. Después, se obtienen las pérdidas globales de potencia óptica en función de la presión aplicada sobre la fibra. Después, se describe el método de obtención de la matriz característica a partir de los barridos experimentales de FFP obtenidos como se describe en el Capítulo 2. Finalmente, se valora el modelo comparando sus predicciones con resultados experimentales.

## 4.1 Sistema de presión

Con la finalidad de caracterizar el comportamiento de las fibras frente a la presión es necesario tener un sistema que permita presionar la fibra y a la vez medir y controlar la presión que estamos ejerciendo.

Para el diseño del sistema de presión que hemos incorporado nos hemos inspirado en la descripción del método descrito en el estándar JIS para propiedades mecánicas [24]. Este sistema se muestra en la Figura 4.1. Consta de una base rectangular (a) donde colocaremos nuestro medidor de presión Force Sensing Resistor 400 5mm Circle x 38 mm (Anexo V) y sobre él, un cilindro grueso con un hueco central (b) que coincide con el diámetro del medidor. En el hueco se introduce una pieza metálica cilíndrica (c) de 4 mm de radio y 32 mm de altura que presionará el medidor de presión y servirá de base para colocar las fibras. Para sujetar la fibra la superficie del cilindro posee dos orificios en los que atornillaremos una placa metálica (d) de 31 mm x 15 mm que al fijarse ejercerá presión sobre la fibra.

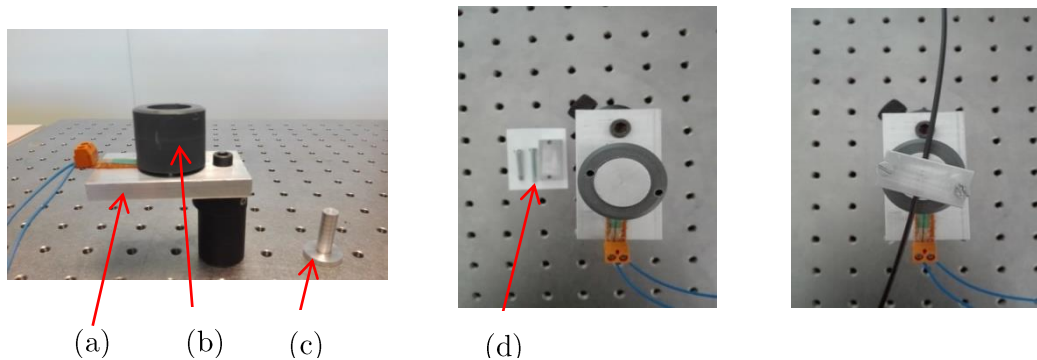


Figura 4.1 Fases del montaje del sistema de presión

En cuanto a la altura se utilizan soportes y vástagos adecuados para poder colocar el sistema cerca del extremo de la fibra enfrente a la pantalla sin que se formen curvaturas espurias como se muestra en la Figura 2.4 del Capítulo 2.

El medidor de presión funciona como una resistencia cuyo valor es inversamente proporcional a la presión ejercida. La hoja de características del medidor incluye una gráfica en la que compara el valor de la resistencia frente al peso que se coloca sobre el medidor pero debido a que hemos alterado el sistema de presión se realiza una nueva caracterización del mismo. Para obtener la curva característica del sensor, conectamos el medidor a un voltímetro que nos mostrará el valor de la resistencia. La caracterización se realiza de la siguiente forma: con los elementos de peso que disponemos se define un intervalo de pesos entre 90 g y 4,10 kg, realizando distintas combinaciones de los elementos para tener medidas equiespaciadas. Una vez determinado el orden, los colocamos sucesivamente en orden creciente, midiendo el valor de la resistencia. Este proceso se repite 4 veces para incluir en nuestras medidas la variabilidad, dejando intervalos largos de reposo ya que el sensor sufre “fatiga” y cambia su respuesta en la región de pesos bajos.

En la Figura 4.2 se representan las 4 medidas realizadas para obtener la curva característica del medidor de presión, junto con su promedio y desviación estándar. Sin embargo este sistema de caracterización tiene una importante limitación y es que nuestro valor máximo de peso medido está en torno a 4 kg. Como el sensor presenta un comportamiento totalmente lineal a partir de 3 kg extenderemos la caracterización a valores superiores mediante una extrapolación lineal que se representa también en la figura con un trazo discontinuo. A pesar de que estamos caracterizando presión el eje horizontal de esta figura representa el peso en gramos. Para obtener la presión equivalente a cada medida de peso:

$$\text{Presión(N/mm}^2\text{)} = \frac{m \cdot g}{S} \quad [\text{Ec 4.1.1}]$$

donde m es la masa en kg, g es la constante de gravedad ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ) y S es la superficie de la fibra sobre la que se ejerce la presión en  $\text{mm}^2$  ( $S = 15 \text{ mm}^2$ ).

De esta forma, por ejemplo, la presión que se ejerce sobre la fibra si colocamos un peso de 4 kg es de  $2.63 \text{ N/mm}^2$  y de  $4.67 \text{ N/mm}^2$  si colocamos un peso de 7 kg

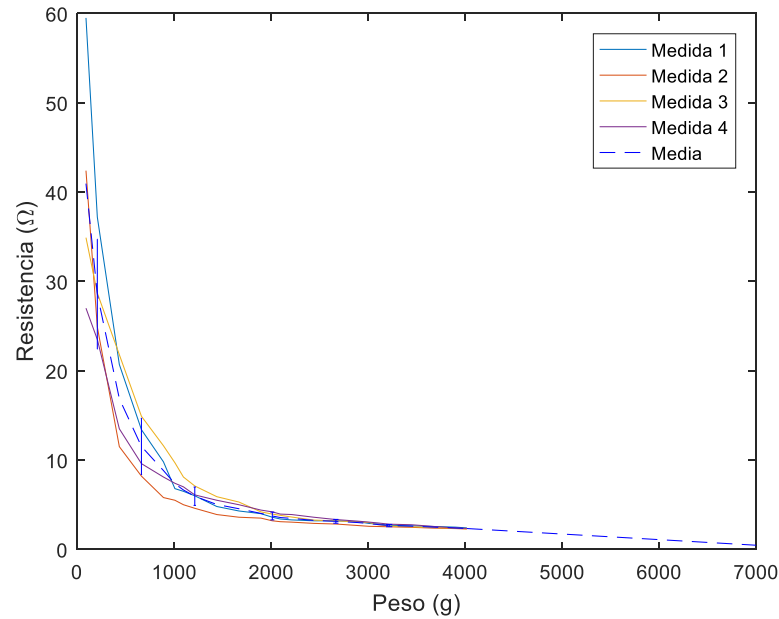


Figura 4.2 Medidas de la curva característica del medidor de presión

## 4.2 Pérdidas de potencia en función de la presión

El efecto de la presión sobre una fibra produce una pérdida de potencia adicional a la atenuación de una fibra sin presión que se especifica en la hoja de características (Anexo IV). Con el fin de caracterizar dicha pérdida de potencia se realiza un experimento preliminar antes de estudiar el efecto completo de la presión.

Para ello se realiza un montaje secundario formado por un emisor Fotec (Anexo IV) que contiene un LED que emite luz a 650 nm. Esta luz se inyecta en el segmento de POF de aproximadamente 1.25 metros utilizando un conector VersaLink. En el otro extremo de la fibra se coloca un detector Fotec (Anexo IV) que nos permite conocer la potencia recibida a través de un display. Para medir la presión aplicada utilizaremos el mismo elemento de presión descrito en el apartado anterior que colocaremos en una posición cercana del receptor como se muestra en imagen de la Figura 4.3.

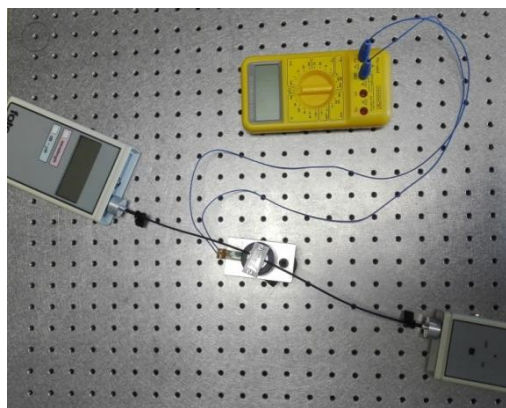


Figura 4.3 Montaje del experimento de cálculo de las pérdidas por presión

Antes de realizar el experimento tomamos una medida de potencia de la fibra sin presionar que nos servirá como referencia para calcular las pérdidas producidas por la presión. Una vez tomada esta medida vamos aumentando la presión sobre la fibra ajustando los tornillos de fijación y tomamos la medida de potencia en recepción. Cada una de las presiones ejercidas es cuantificada por el medidor de presión en un valor en  $\Omega$  que podremos transformar a cantidad de peso (gramos) mediante el modelo realizado en el apartado 4.1.

Una vez que tenemos las medidas de la potencia para cada una de las presiones calculamos las pérdidas por dicha presión como:

$$L_{presión}(dB) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{ref}}{P_{presión}} \right) \quad [Ec\ 4.2.1]$$

Donde  $P_{ref}$  es la medida de potencia de referencia en  $\mu W$  y  $P_{presión}$  es la medida de potencia tras ejercer una de las presiones también en  $\mu W$ .

Este experimento se realiza para 3 tramos distintos de una fibra de salto de índice GH-POF y también 2 de la fibra GI-POF.

En la Figura 4.4 se muestra cada una de estas medidas (rojo, azul y verde) junto con el promedio (negro). Los valores de peso a los que se han tomado las medidas para cada uno de los segmentos no son los mismos por lo que cada medida está compuesta por los puntos de las medidas y la recta que los interpola. En la gráfica de la izquierda se muestran las medidas relativas a la fibra SI-POF y en la de la derecha las relativas a la fibra GI-POF.

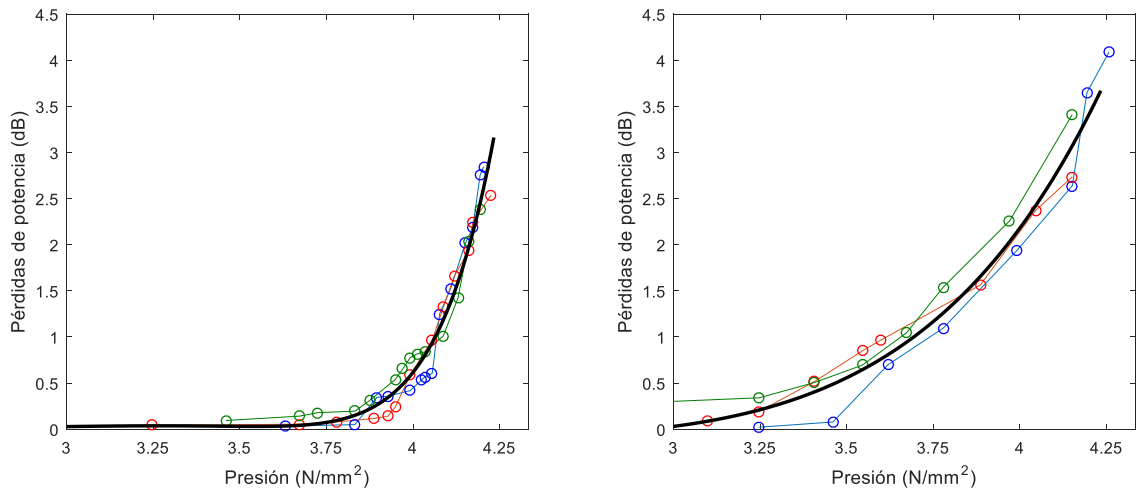


Figura 4.4 Pérdida de potencia debido al efecto de la presión para la fibra SI-POF y GI-POF



Las gráficas muestran diferencias en el comportamiento de ambas fibras a pesar de que ambas se han fabricado nominalmente con el mismo material (PMMA). La fibra GH-POF de perfil de salto de índice se mantiene sin apenas pérdidas hasta un valor de  $3.6 \text{ N/mm}^2$  y luego crece de forma abrupta alcanzando los 3 dB para una presión de  $4.15 \text{ N/mm}^2$  equivalente a un peso de 6.35 kg. La fibra de índice gradual también presenta un aumento más gradual de las pérdidas que, sin embargo, son mayores que para la fibra GH-POF con presiones similares (4 dB para  $4.25 \text{ N/mm}^2$ ).

## 4.3 Matriz característica de la presión

### 4.3.1 Protocolo experimental

El protocolo de caracterización consiste en obtener barridos angulares de los FFPs antes y después de ejercer la presión, para el mismo segmento de fibra y sin modificar las condiciones, particularmente la inyección. Para esta caracterización nos hemos centrado en las mismas fibras que para el experimento descrito en el apartado 4.2. Para cada una de ellas se ha repetido el protocolo de medida en al menos 5 segmentos de fibra de 1.25 metros.

Con cada uno de dichos segmentos, se sigue el siguiente procedimiento:

- 1) De una bobina de la fibra que vamos a medir cortamos un segmento de aproximadamente 1,25 metros (misma longitud que el experimento realizado en el apartado 4.2). Cortamos ambos extremos y preparamos ambos como se describe en el Anexo II. Colocamos la fibra de la forma más recta posible evitando curvaturas que afecten a nuestra medida. Tras esto aplicamos el protocolo de alineamiento descrito en el Capítulo 2. Una vez alineada la POF con la GOF se obtiene un barrido de los FFPs en función del ángulo de inyección  $\theta_{iny}$  aplicando el procedimiento ya explicado. Aunque el barrido angular se realiza para ángulos  $\theta_{iny}$  entre  $-40^\circ$  y  $40^\circ$  para analizar nuestros resultados así como para extraer el comportamiento de la presión consideraremos que cada barrido está compuesto por dos medidas individuales: una la correspondiente a los ángulos positivos:  $\theta_{iny} < 0^\circ$  y otra para los ángulos negativos:  $\theta_{iny} > 0^\circ$ . Estas medidas se almacenan en forma de matriz, con el perfil radial para cada ángulo en una de las columnas de la misma. Dicha matriz se denominará:  $\mathbf{P}_0$  y se presenta como imagen a la izquierda de la Figura 4.4 para uno de los segmentos analizados. En la parte superior se presentan las medidas correspondientes a la fibra SI-POF y en la inferior, a la GI-POF.

- 2) Controlando la presión ejercida con el voltímetro que hemos incorporado a nuestro sistema realizamos la presión sobre la fibra. La presión que ejerceremos será la equivalente a colocar un peso de 6.1 kg sobre un área de fibra de 15 mm x 1 mm y por lo tanto de  $4 \text{ N/mm}^2$ .
- 3) Una vez presionada la fibra podemos observar que uno de los efectos palpables a priori es la pérdida de potencia en prácticamente todos los ángulos de inyección. Por ello, para poder tomar una buena medida del comportamiento de la presión es necesario aumentar el tiempo de exposición. Este parámetro lo tendremos que tener en cuenta a la hora de procesar la medida obtenida. Una vez hecho esto se obtiene un barrido de los FFPs en función de  $\theta_{iny}$  aplicando el procedimiento ya mencionado. La matriz de medidas obtenida en este caso se denominará:  $\mathbf{P}_1$ . En la Figura 4.4 se muestran también las matrices obtenidas al realizar un barrido angular una vez que la fibra está presionada (derecha). Para visualizar mejor las diferencias entre el comportamiento de la fibra con y sin presión en cada una de las fibras cada par de imágenes está normalizado al máximo de ambas (que se encuentra lógicamente en la medida de referencia).
- 4) Para terminar, en algunos casos, se ha tomado un barrido después de soltar la fibra del elemento de presión con objeto de determinar si se producen cambios permanentes en sus propiedades.

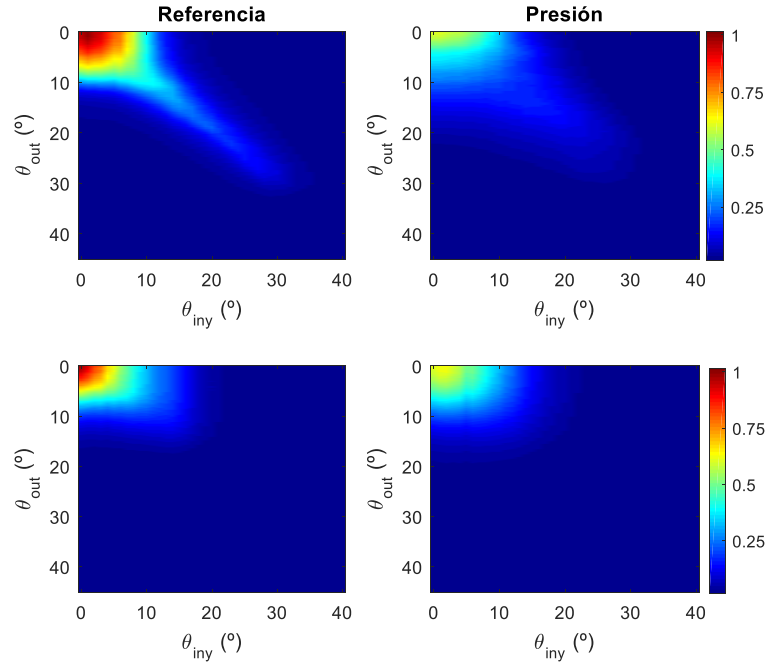


Figura 4.5 Resultados obtenidos para las fibras SI-POF y GI-POF con y sin presión

Comparando las imágenes de referencia con las de presión, puede verse que el efecto de la presión no es sólo pérdida de potencia que se hace evidente por los menores niveles que se alcanzan en las imágenes de la izquierda (colores más fríos). Además, se advierte un ensanchamiento de los patrones tanto en la parte central como en los ángulos altos, producido por transferencia o difusión de potencia a los ángulos adyacentes. En el siguiente apartado se describirá como caracterizar estos efectos utilizando una matriz.

En nuestros experimentos nos hemos centrado en la caracterización de un único valor de presión, que se ha elegido teniendo en cuenta varios factores. En primer lugar, para presiones menores se ha verificado que los perfiles radiales apenas varían por lo que el método de caracterización no se podría aplicar en dichos casos, debido a que los cambios debidos a la presión son comparables a la variabilidad de la medida debida a las diferencias en el corte, posición, etc. Además, la presión elegida se encuentra por encima del punto de inflexión en el cual las pérdidas comienzan a crecer abruptamente con la presión ejercida sobre la fibra y en una región en la que el medidor de presión presenta poca variabilidad lo que implica que si buscamos siempre el mismo valor de resistencia en el voltímetro podremos considerar que la presión ejercida sobre la fibra es la misma. Por otra parte, se ha comprobado que la presión necesaria para sujetar la fibra firmemente a una superficie plana es del orden de la que hemos caracterizado y por tanto, es difícil que en la instalación de fibra se alcancen presiones muy superiores a ésta. En algunas de las medidas, se ha obtenido el barrido de FFPs después de soltar la fibra presionada. Los patrones obtenidos son de anchura similar a los obtenidos antes de la presión aunque los niveles de potencia se encuentran para ángulos bajos entre el de la referencia y el presionado. En la Figura 4.6 se muestran los perfiles antes, durante y tras la presión.

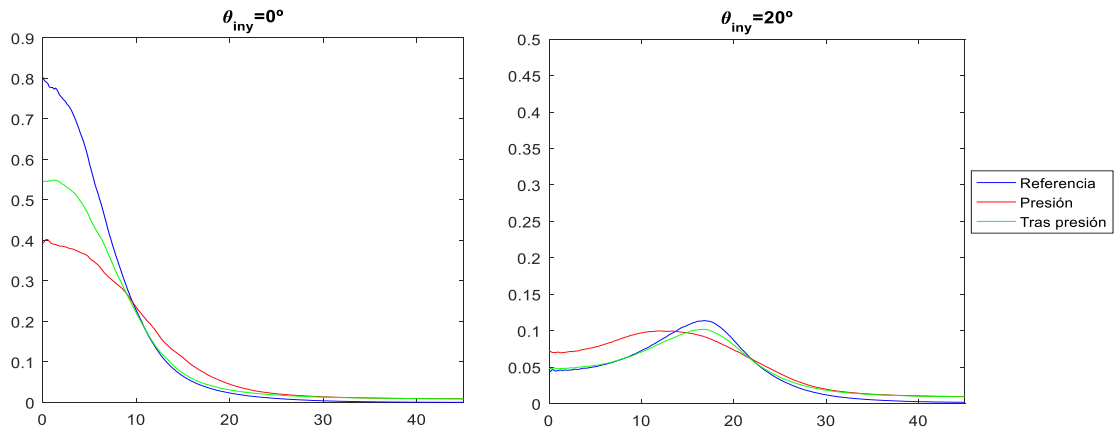


Figura 4.6 Comparación de los perfiles radiales antes, durante y tras la presión para  $\theta_{iny} = 0^\circ$  y  $\theta_{iny} = 20^\circ$

Tras quitar el elemento que presiona la fibra desaparece la difusión provocada y parte de la atenuación. A pesar de ello existe un efecto deformatorio de la fibra que le impide recobrar su comportamiento antes de la presión.

### 4.3.2 Modelo matricial de la presión

Una vez realizadas las medidas se propone un modelo matemático de la presión que permita caracterizarla mediante una matriz que se integre como un nuevo bloque al entorno de simulación de POF y dispositivos desarrollado por el grupo [2, 13,14].

Al igual que otros dispositivos o perturbaciones, debemos suponer que el efecto de una presión concreta sobre la fibra actúa como un sistema lineal, de forma que la potencia en un determinado ángulo después de aplicar la presión puede caracterizarse mediante una combinación lineal de las potencias en los ángulos antes de aplicarla [3, 16,17]. De esta forma, la relación entre las medidas de referencia:  $\mathbf{P}_0$ , con las obtenidas después de aplicar la presión:  $\mathbf{P}_1$  puede ponerse como:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{M}_P \cdot \mathbf{P}_0 \quad [\text{Ec } 4.3.1]$$

donde  $\mathbf{M}_P$  es la matriz característica de la presión,

Para describir esta matriz, utilizaremos una serie de parámetros cuyo valor se obtendrá minimizando la norma del error entre la medida y la simulación con el modelo:

$$\text{Error} = \|\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_s\| \quad [\text{Ec } 4.3.2]$$

donde  $\mathbf{P}_s$  representa la matriz simulada y  $\mathbf{P}_1$  la matriz de la medida con presión. Para realizar el ajuste de los parámetros que minimizan dicho error se ha utilizado la rutina de Matlab™: *fminsearch*.

Siguiendo la línea del modelo utilizando para el scrambler [3] se ha modelado el efecto de la presión tanto en SI-POF como en GI-POF como el producto de dos matrices, una matriz diagonal que da idea de la pérdida de potencia o atenuación:  $\mathbf{A}$  y otra matriz que cuantifica el ensanchamiento o difusión:  $\mathbf{D}$ .

$$\mathbf{M}_P = \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad [\text{Ec } 4.3.3]$$

La diagonal de la matriz  $\mathbf{A}$  viene descrita por una función sigmoide del ángulo  $\theta_{out}$  multiplicada por una constante  $h$ . El valor  $\theta_c$  representa el valor de transición de la sigmoide y el valor de  $s$  representa la pendiente de dicha transición. Este ángulo de

transición es el ángulo a partir del cual prácticamente deja de transmitirse potencia por la fibra, y es diferente para la fibra SI-POF que para la GI-POF.

$$A(\theta_{out}) = \frac{h}{1 + e^{\left(\frac{\theta_{out} - \theta_c}{s}\right)}} \quad [\text{Ec 4.3.4}]$$

La matriz  $D$  es una función gaussiana de área normalizada que depende del ángulo de entrada y del de salida:

$$D(\theta_{in}, \theta_{out}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left[\frac{\theta_{out} - g \cdot \alpha(\theta_{in})}{\sigma}\right]^2} \quad [\text{Ec 4.3.5}]$$

donde el valor de  $\sigma$  representa su anchura y el valor  $g \cdot \alpha(\theta_{in})$  la media. Esta media es variable dependiendo del ángulo de entrada y de salida, lo que nos permitirá diferenciar la difusión en de ángulos bajos y altos. La función  $\alpha(\theta_{in})$  es distinta para las fibras SI-POF y de las GI-POF puesto que en estas últimas no es necesario modelar de forma diferente el comportamiento de ángulos bajos y altos. Para las fibras SI-POF:

$$\alpha(\theta_{in}) = \begin{cases} \theta_0, & \theta_{in} \leq \theta_0 \\ \theta_{in}, & \theta_{in} > \theta_0 \end{cases} \quad [\text{Ec 4.3.6}]$$

En caso de las fibras GI-POF simplemente  $\alpha(\theta_{in}) = \theta_{in}$  por lo que en el caso de este modelo el parámetro  $\theta_0 = 0^\circ$ .

Tras un estudio previo, se han seleccionado los parámetros más adecuados para realizar la minimización del error en cada tipo de fibras y se han determinado los valores del resto de los parámetros que se han considerado fijos para cada tipo de fibra. De los 6 parámetros que podríamos ajustar para minimizar el error, el ángulo y pendiente de la función de atenuación y el ángulo medio de la Gaussiana toman un valor fijo para cada tipo de fibra que se da en la siguiente tabla:

	$\theta_c$ (°)	$g$	$\theta_0$ (°)
<b>GH-POF</b>	30	1.1	4.1
<b>GI-POF</b>	25	1	0

Tabla 4.1. Parámetros fijos del modelo matemático para las fibras SI-POF y GI-POF

Como hemos dicho, los otros 3 parámetros se ajustan utilizando la rutina `fminsearch` de Matlab para minimizar el error descrito en la [Ec 4.3.1]- En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros ajustados a las medidas del ejemplo de la Figura 4.4 y su error dado por [Ec 4.3.1].

	<b>h</b>	<b>s (°)</b>	<b><math>\sigma</math> (°)</b>	<b>Error</b>
<b>GH-POF</b>	0.002548	1.327	10.02	1.3
<b>GI-POF</b>	0.002473	1.439	4.54	0.99

Tabla 4.2. Parámetros del modelo matemático y error de una medida para las fibras SI-POF y GI-POF

La Figura 4.7 muestra las matrices características obtenidas utilizando los parámetros de la Tablas 1 y 2. Se observa que los efectos de la presión son muy diferentes para ambos tipos de fibra. Para la fibra de salto de índice (a la izquierda) la matriz característica de la presión presenta valores menores: el valor máximo es de 0.011 frente a 0.035 en la GI-POF a la derecha, y también una transferencia de potencia a un rango de ángulos mucho mayor (mayor ensanchamiento).

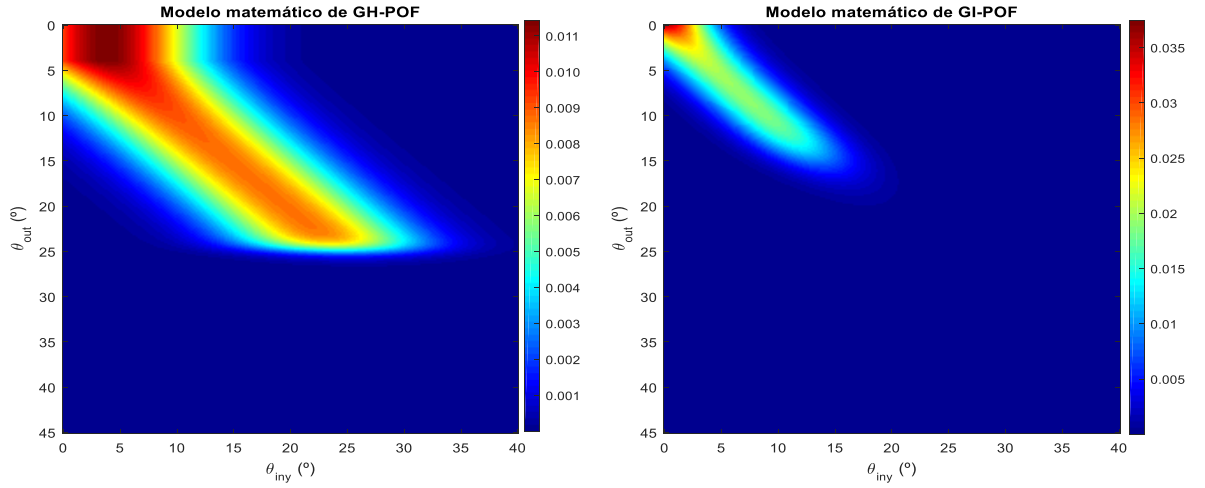


Figura 4.7 Matrices características de la presión para un tramo de fibra SI-POF y GI-POF

Una vez obtenido el modelo matricial que caracteriza la presión podemos aplicarlo a la medida para obtener  $\mathbf{P}_s$ :

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{M}_p \cdot \mathbf{P}_0 \quad [\text{Ec 4.3.7}]$$

Para visualizar la distribución del error, en la Figura 4.8 comparamos la matriz de perfiles obtenida experimentalmente  $\mathbf{P}_1$ , (izquierda) con la simulada  $\mathbf{P}_s$  (centro). A la derecha se presenta el módulo del error para cada perfil y cada ángulo, con una escala distinta a la de las otras cuatro imágenes debido al orden de magnitud del error.

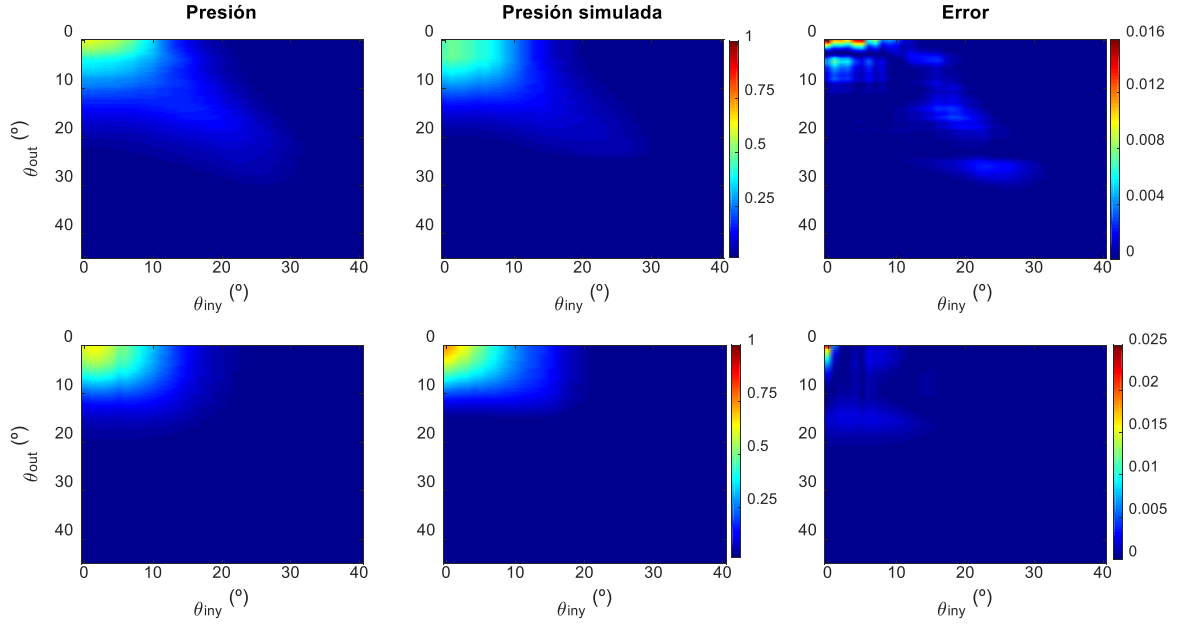


Figura 4.8 Resultados obtenidos tras aplicar el modelo matemático a una fibra SI-POF y una GI-POF y error del modelo

### 4.3.3 Matriz característica promedio

Hasta ahora hemos analizado únicamente el efecto de la presión sobre una medida de cada una de las fibras estudiadas con el objetivo de ilustrar el procedimiento completo. Nuestro objetivo es elaborar un único modelo matemático para cada una de las fibras que, al aplicarlo a todas las medidas, nos de errores aceptables. Para ello, se han ajustado los parámetros descritos para todas las parejas de medidas realizadas. De estas medidas, se han descartado aquellas cuyo error es demasiado alto o cuyos parámetros de ajuste se alejan excesivamente del promedio. De esta forma, se han seleccionado 7 medidas para la fibra SI-POF y 10 para la GI-POF y se han obtenido los parámetros que minimizan el error para una de ellas. Con el promedio de estos parámetros se obtienen los parámetros finales para la obtención de la matriz característica de cada tipo de fibra.

En la Figura 4.9 se muestran los valores de los parámetros ajustados para cada par de medidas en forma de diagrama de barras. Los diagramas de barras de la parte superior pertenecen a la fibra SI-POF mientras que los de la parte inferior corresponden a la GI-POF. En cada diagrama, la línea de color rojo representa el valor promedio del parámetro y la barra azul es la desviación estándar del parámetro. Cada parámetro tiene asociado un eje vertical común para ambas fibras permitiendo así que comparemos los valores tanto para cada una de las fibras como entre ellas.

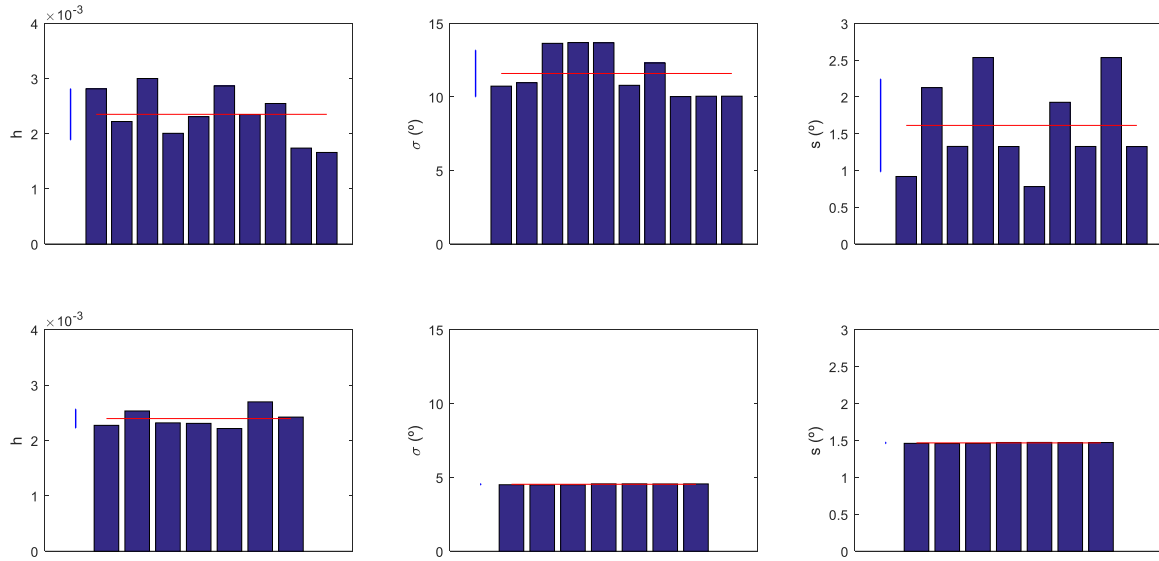


Figura 4.9 Diagrama de barras con los parámetros del modelo para cada medida de las fibras SI-POF (arriba) y GI-POF (abajo)

En la figura se aprecia que los valores de los parámetros son diferentes para ambos tipos de fibra. Particularmente la anchura de la Gaussiana que relacionamos con la difusión de potencia producida por la presión, es la mitad para la fibra GI-POF que para la GH-POF. En la Tabla 4.3 se muestran los parámetros promedio y su desviación estándar, que es bastante menor en el caso de la fibra GI-POF.

		$h$	$s$ (°)	$\sigma$ (°)
GH-POF	Promedio	0.002351	1.613	11.59
	Desv. estándar	0.000463	0.62	1.58
GI-POF	Promedio	0.002395	1.36	4.53
	Desv. estándar	0.000168	0.0067	0.0316

Tabla 4.3. Parámetros promedio y desviación estándar del modelo matemático para fibras SI-POF y GI-POF



Finalmente, en la Figura 4.10 se muestran las matrices características promedio para las dos fibras estudiadas. Si comparamos esta figura con la Figura 4.4 que nos mostraba las matrices características del modelo para una única medida encontramos que se mantiene la misma forma.

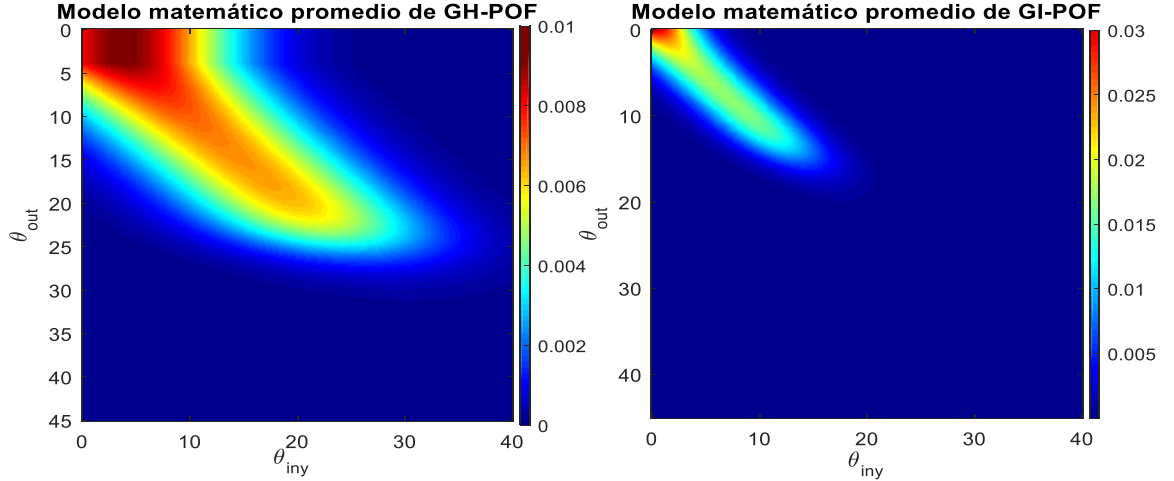


Figura 4.10 Matrices características promedio de la presión de las fibras SI-POF y GI-POF

Siguiendo con el ejemplo de la Figura 4.4 se aplica el modelo matemático de la Figura 4.9 a las medidas de referencia  $\mathbf{P}_0$  de ambas fibras y se obtiene el error comparando con la medida con presión en cada caso. Debido a que el modelo que estamos aplicando es un promedio, el error aumenta con respecto al obtenido para el ajuste individualizado reflejado en la Tabla 4.2: en el caso de la SI-POF el error aumenta de 1.3 a 2.06 mientras que en la GI-POF el error aumenta de 0.99 a 1.8. En la Figura 4.12 se representa en un diagrama de barras el error cometido tras aplicar el modelo individual (azul) y el modelo promedio (rojo) para cada una de las medidas. A la izquierda se encuentra el diagrama de barras para SI-POF y a la derecha GI-POF.

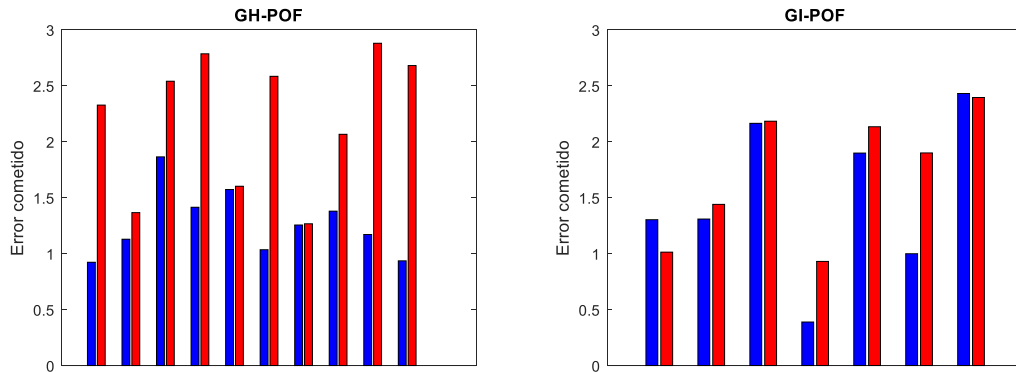


Figura 4.11 Diagrama de barras de los errores cometidos por cada uno de los modelos matemáticos

El error cometido tras aplicar el modelo promedio se encuentra en el intervalo  $[1.26, 2.86]$  en el caso de la SI-POF y  $[0.93, 2.39]$  para la GI-POF. En ambas gráficas podemos certificar que debido a la variabilidad de los parámetros de la SI-POF el modelo promedio aumenta mucho el error en comparación con el modelo de la GI-POF, que es más similar a los modelos individuales por lo que no aumenta mucho el error.

Por otro lado, una vez que hemos obtenido el modelo de una fibra SI-POF queremos estudiar la posibilidad de usar el mismo modelo a otras fibras SI-POF como por ejemplo la fibra HFBR-POF. Aplicando el mismo procedimiento calculamos la respuesta simulada a partir de una medida sin presión de la fibra HFBR-POF y el modelo matemático promedio de la GH-POF y comparamos con la medida con presión. En la Figura 4.12 se muestran los resultados: a la izquierda la matriz de medidas sin presión, en el centro la medida con presión y a la derecha la matriz simulada. Esta se aproxima bastante a la experimental con un error de 1.68, que es incluso menor que el error obtenido con la matriz promedio para la GH-POF en medidas tomadas para la misma fibra. Este mismo procedimiento se ha realizado con un grupo de medidas de HFBR-POF obteniendo un error promedio de 2.84 por lo que se considera que el modelo de GH-POF puede ser usado como herramienta aproximada para estimar cómo afectará la presión a cualquier fibra de salto de índice de características similares.

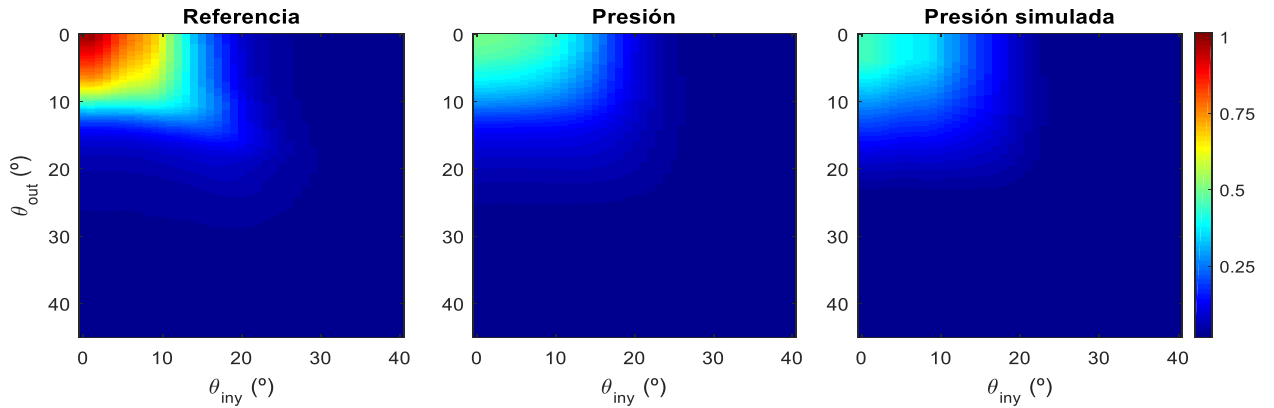


Figura 4.12 Resultados tras aplicar el modelo matemático promedio de GH-POF a una medida sin presión de HFBR-POF

## 4.4 Comparación de las predicciones del modelo con medidas experimentales

A lo largo de todo este capítulo hemos visto que los principales efectos que la presión produce en las fibras POF son una pérdida de potencia y una difusión. En el apartado 4.2 se realiza un experimento para determinar este valor de pérdida de potencia y en el apartado 4.3 se realiza un modelo matricial que caracterice ambos efectos. En este apartado se realiza otro experimento que nos permite valorar la

precisión del modelo comparando sus predicciones con las medidas experimentales obtenidas en 4.2.

Para este experimento utilizamos de nuevo el bloque de registro descrito explicado en el Capítulo 2 y el emisor LED de Fotec del apartado 4.2. La luz del LED se inyecta a través de un conector VersaLink en nuestra fibra POF cuyo extremo final situamos frente a la pantalla del bloque de registro para obtener el FFP correspondiente. En este caso no se realiza un barrido por lo que no es necesario que la fibra se coloque sobre la base rotatoria. Con el fin de obtener una mejor medida de referencia se toma 5 veces el perfil radial para después promediarlo. Este procedimiento se repite para cada una de las 2 fibras caracterizadas: SI-POF y GI-POF. Esta medida promedio es un vector y corresponde a la referencia obtenida con el LED del sistema Fotec. Para obtener el vector que representa la distribución de potencia de la medida con presión aplicamos:

$$\mathbf{P}_{\text{sim}} = \mathbf{M}_{\text{c}} \cdot \mathbf{P}_{\text{ref}} \quad [\text{Ec 4.3.8}]$$

donde  $\mathbf{P}_{\text{ref}}$  corresponde a la distribución de potencia de referencia obtenida con inyección mediante LED (medida sin presión),  $\mathbf{P}_{\text{sim}}$  corresponde a la distribución de potencia simulada cuando se aplica presión y  $\mathbf{M}_{\text{c}}$  es la matriz característica de la presión que obtuvimos en los apartados anteriores.

El objetivo de este experimento es comparar la pérdida de potencia medida en el apartado 4.2 con la obtenida en esta simulación. Para ello definimos la potencia como en el Capítulo 2 y la pérdida de potencia como en la [Ec 4.2.1]. Con el fin de estudiar también la variabilidad de las pérdidas se calculan tanto las pérdidas aplicando cada uno de la matrices individuales obtenidas anteriormente así como las obtenidas aplicando el modelo promedio.

En la Figura 4.13 se muestra la curva promedio calculada a partir de las medidas experimentales mostradas en la Figura 4.4 junto con las pérdidas del modelo promedio marcado con un cuadrado. La barra de error representa la desviación estándar obtenida a partir de las pérdidas calculadas utilizando todas las matrices características individuales.

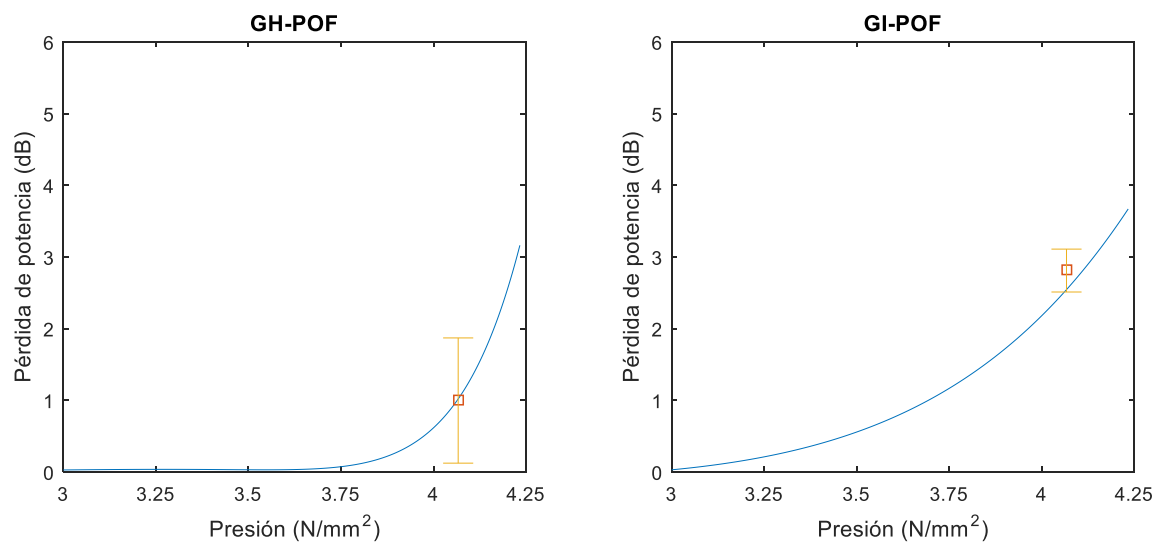


Figura 4.13 Pérdida de potencia del efecto de la presión en la fibra SI-POF y GI-POF

# Capítulo 5. Conclusiones

---

## 5.1 Aportaciones del TFG y valoración del trabajo

En este proyecto, se ha diseñado y realizado un nuevo bloque dentro del sistema de obtención del perfil radial del campo lejano de POFs. Se trata de un bloque que realiza la inyección de luz en la POF mediante una SMV en lugar de hacerlo directamente con un láser de He-Ne. El nuevo bloque incorpora elementos que ayudan al centrado de ambas fibras lo cual no sólo es crucial para obtener resultados precisos sino que permiten analizar su comportamiento en función de distintos parámetros.

Además, el bloque se ha integrado en el sistema experimental de manera que es posible cambiar de un método de inyección a otro de forma sencilla y sin modificaciones sustanciales en el montaje. Esta posibilidad ha permitido realizar comparaciones de barridos angulares del perfil de campo lejano obtenidos con ambos métodos. De esta comparación hemos concluido que la inyección con mono-modo de visible, a pesar de su mayor apertura angular, produce los mismos resultados obtenidos con el láser de He-Ne en los ángulos centrales, tanto para fibras de salto de índice como para fibras de índice gradual. En este sentido hay que matizar que para las fibras de salto de índice en ángulos altos de propagación se encuentran anchuras mayores con inyección por SMV cuando el campo lejano tiene forma de anillo. Además, la distancia entre la POF y la SMV que no tiene apenas influencia para fibras con perfil de salto, es crucial para fibras de índice gradual en las que al alejar la fibra de inyección se incrementa gradualmente la anchura del perfil de FFP.

Se ha estudiado también la variación de distintos parámetros extraídos del perfil de campo lejano en función de la posición radial de la inyección: valor del máximo, anchura a media altura y potencia total. Se ha verificado el fuerte impacto de la preparación de los extremo de inyección de la fibra demostrando que el proceso de pulido reduce notablemente la variabilidad y produce resultados más uniformes de dichos parámetros a lo largo de la coordenada radial. Por otra parte, nuestros resultados revelan que dicha variación es diferente según el perfil de la fibra.

Por último, utilizando el sistema desarrollado se ha obtenido la matriz de caracterización de los efectos de una presión sobre la POF similar a la que se aplica en su instalación. Este método, que consiste en comparar barridos angulares de FFP sin y con presión, ha permitido determinar dicha matriz que es diferente para fibras de distinto perfil.

Nuestros resultados revelan que el efecto de una presión de  $4 \text{ N/mm}^2$  en fibras de salto de índice es fundamentalmente difusivo, es decir, de transferencia de potencia a un rango grande de ángulos. En cambio, en el caso de las fibras de índice gradual, la difusión de potencia es menor pero las pérdidas totales de potencia son similares o incluso mayores. La matriz característica final es el promedio de las obtenidas para varios tramos de fibras que muestran una menor variabilidad para la fibra de índice gradual. Como contrapartida, el modelo para fibra de índice de salto que fue obtenido para un tipo de fibra concreto, puede utilizarse también para otras de las mismas características, pero de distintos fabricantes. Las predicciones de ambos modelos se han comparado con medidas experimentales de pérdidas globales de potencia mostrando buen acuerdo.

## 5.2 Líneas futuras

A lo largo de este proyecto se ha caracterizado el efecto de una presión concreta. Utilizando el mismo montaje y los mismos protocolos desarrollados en el Capítulo 4 se podrían caracterizar otras presiones y buscar una expresión analítica que permita obtener la matriz característica en función de la presión aplicada. Una vez estudiadas estas, se debería incluir el modelo de presión basado en matrices en los entornos de software de simulación de redes POF desarrollados por el grupo.

También con el montaje de este proyecto se podría volver a caracterizar algunos efectos caracterizados en anteriores proyectos como el efecto del scrambler, conectores [16,18] o curvaturas [25] y comparar los resultados con los obtenidos para el láser de He-Ne. Esto, sería particularmente en el caso de las curvaturas ya que el sistema desarrollado en este trabajo permite la colocación de la fibra completamente recta y sin movimiento durante todo el barrido por lo que se minimizarían efectos de curvaturas espurias.

Además, partiendo del montaje experimental desarrollado en este proyecto sería altamente interesante aumentar su precisión para poder aplicarlo a la caracterización de fibras multi-core para realizar barridos angulares inyectando en cada uno de los núcleos.

Finalmente se podría valorar el efecto de la presión en el ancho de banda obteniendo la respuesta en frecuencia, el BER y el diagrama de ojo de POFs en las que se han aplicado presiones en distintos puntos y comparar los resultados experimentales, y las predicciones del modelo matricial.

# Bibliografía y Referencias

---

1. J. Mateo, M.A. Losada, I. Garcés, J. Zubia, “Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers”, *Optics Express*, Vol. 14, No. 20, 9028-9035, (2006).
2. J. Mateo, M. A. Losada, A. López, “Modeling of Polymer Optical Fibres”, *Communication in Transportation Systems*, Otto Strobel, Ed. IGI Global, Feb. 2013, ch. 4.
3. M. A. Losada, J. Mateo & J. J. Martínez Muro, “Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model”, *IOP Journal of Optics*, Vol. 13, 055406 (6pp), (Marzo 2011).
4. M.A. Losada, J. Mateo, A. López, N. Antoniadis, D. Richards, “Challenges in the Integration of Plastic Optical Fibre Technology in Aircrafts”, in *Proceedings of 14th International Conference on Transparent Optical Networks*, Warwick University, Coventry (UK), (6/2012).
5. J. Mateo, M. A. Losada, A. Lopez “Application of the Plastic Optical Fibre in Domestic Multimedia Networks”, in *Proceedings of 3rd. International Conference on Transparent Optical Networks* (2009).
6. J. Mateo, M.A. Losada, I. Garcés, J. Zubia, “Design and implementation of custom MOST ring network prototypes”, in *Proceedings of the 15th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application*, 456-461, Seoul (Corea), (09/2006).
7. M.A. Losada, J. Mateo, D. Espinosa, I. Garcés and J. Zubia, “Characterisation of the far field pattern for plastic optical fibres”, in *Proceedings of the 13th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, pp458-465, Nuremberg (Alemania), (09/2004).
8. J. Mateo, M.A. Losada, J.J. Martínez-Muro, I. Garcés, J. Zubia, “Bandwidth measurement in POF based on general purpose equipment”, in *Proceedings of the 14th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application*, Honk-Kong (China), (09/2005).
9. J. Mateo, M.A. Losada, J. Zubia, “Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation”, *Optics Express*, Vol. 17: 4, 2850-2860, (2009).

10. O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems", 2nd Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008).
11. M.A. Losada, J. Mateo, "Short-Range (in-building) Systems and Networks: A Chance for Plastic Optical Fibres", WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering (2012)
12. D. Richards, M.A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos, "Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System", Journal of Lightwave Technology, 31(3), 468 (8pp), (02/2013).
13. López, M.A. Losada, J. Mateo, "Simulation framework for POF-based communication systems", in Proceedings of the 17th International Conference on Transparent Optical Networks, Budapest (Hungria), (07/2015).
14. Alcoceba, A. López, M. A. Losada, J. Mateo, C. Vázquez, "Building a simulation framework for POF data links", in Proceedings of the 24th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application, Nurnberg (Alemania), (09/2015).
15. Flor, A. López, D. Richards, M. A. Losada, J. Mateo, J. Zubia, "Performance of electronic equalization techniques applied to POF links", in Proceedings of the 24th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application, Nurnberg (Alemania), (09/2015).
16. A. Esteban, M. A. Losada, "Análisis de los efectos de conectores sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico", Proyecto Final de Carrera, Ingeniería de Telecomunicaciones, Zaragoza: s.n., (2011).
17. M. A. Losada, A. López, and J. Mateo, Attenuation and diffusion produced by small radius curvatures in POFs aceptado en OPEX 2016.
18. F. A. Domínguez, M. A. Losada, "Análisis de pérdidas en conectores para fibras de plástico", Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Zaragoza: s.n., (2014).
19. M. Chueca, M. A. Losada, "Desarrollo de un sistema experimental para medidas de campo cercano en fibras ópticas de plástico multinúcleo", Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Zaragoza: s.n., (2015).
20. Japanese Industrial Standard, "Test methods for structural parameters of all plastic multimode optical fibres", JIS C 6862, Japan. 1992.



21. Joseba Zubia and Jon Arrue, Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications, Optical Fiber Technology 7, 101-140, (2001).
22. M.A. Losada, J. Mateo, I. Garcés, J. Zubía, J.A. Casao, and P. Pérez-Vela, “Analysis of strained plastic optical fibres”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol 16, No 6, 1513-1515, (2004).
23. M.A. Losada, I.Garcés (Member), J. Mateo, I. Salinas, J. Lou & J. Zubía, “Mode coupling contribution to radiation losses in curvatures for high and low numerical aperture plastic optical fibres”, Journal of Lightwave Technology, Vol 20, n. 7, 1160-1164, (2002).
24. Japanese Industrial Standard, “Test methods for mechanicals parameters of all plastic multimode optical fibres”, JIS C 6861, Japan. 1992.
25. M. Andrés, M.A. Losada, “Caracterización matricial de las curvaturas en fibra óptica de plástico”, Proyecto Final de Carrera, Ingeniería de Telecomunicaciones, Zaragoza: s.n., (2015).



# Anexo I. Fibra óptica: estructura, características y clasificación

---

La fibra óptica hoy en día está a la cabeza en cuanto a comunicaciones de alta velocidad se refiere y se ha convertido en uno de los principales medios de transmisión de redes transoceánicas debido a su baja atenuación y alta tasa de transmisión.

A pesar de ser uno de los medios más utilizados en largas distancias es muy usual que la fibra óptica sea utilizada cada vez más como medio de transmisión en automóviles, trenes o incluso dentro del hogar. Es en estas aplicaciones de pequeña distancia en las que quedan más patentes los inconvenientes de la fibra óptica: la atenuación y en ancho de banda. Es por esto que en la actualidad se investiga en técnicas más sofisticadas de transmisión por fibra óptica como bien puede ser la multiplexación por división espacial en las fibras de plástico multinúcleo.

## I.1 Características geométricas

Para determinar qué cantidad de luz procedente de una fuente puede acoplarse en una fibra, son de interés las dimensiones de la fibra y su apertura numérica (NA).

El índice del núcleo ( $n_{co}$ ) es siempre superior al del cladding ( $n_{cl}$ ) por lo que todas aquellas ondas que se propagan en el interior de una fibra e inciden con un ángulo  $\theta_{inc}$  mayor que el ángulo crítico  $\theta_{critico}$  son reflejadas por el cladding con un ángulo  $\theta_{refl}$  igual al de incidencia.

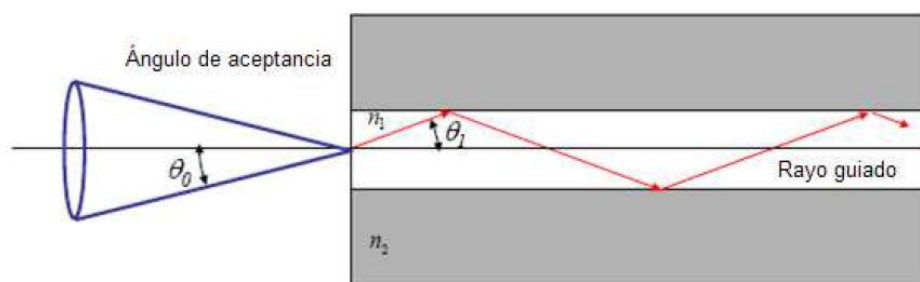


Figura I.1 Propagación de la luz en una fibra óptica

Uno de los parámetros de la fibra óptica es el ángulo de aceptación, que es el ángulo máximo con el que se debe incidir sobre el núcleo ( $\theta_0$ ) para que el rayo se propague por la fibra. Este parámetro está directamente relacionado con los índices de refracción del núcleo y del cladding a través del NA y que cumple las siguientes relaciones:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad [\text{Ec I.1}]$$

$$\theta_0 = \sin^{-1}(NA) \quad [\text{Ec I.2}]$$

La apertura numérica típica de la POF toma valor entre 0.46 y 0.50. Teniendo en cuenta que una gran apertura numérica favorece el mejor acoplamiento de la luz pero va en detrimento del ancho de banda la fibra, con lo que está inversamente ligado.

## I.2 Fenómenos de la fibra óptica: atenuación y dispersión

La fibra óptica posee grandes características que la han hecho ser uno de los medios de propagación más utilizados pero también posee dos fenómenos limitantes: la atenuación y la dispersión.

### I.2.1 Atenuación

La potencia de luz transportada por una fibra óptica se atenúa durante su propagación. La luz es absorbida en distinta medida debido al scattering del medio y por las reflexiones entre el núcleo y la cubierta. La reducción en potencia entre los dos extremos de un tramo de fibra se expresa en decibelios a través de la relación:

$$\alpha(dB) = 10 * \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right) \quad [\text{Ec I.3}]$$

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

Otros factores como la humedad y la temperatura cambian ligeramente el espectro de absorción, por lo que la atenuación es sensible a las condiciones de fabricación de la fibra. Es por esto que cuando se fabrica un carrete de fibra óptica se facilita un intervalo de atenuaciones, y cada tramo de fibra óptica tomará un valor u otro en función de las condiciones en las que este tramo se ha fabricado.

Los mecanismos que provocan las pérdidas ópticas en la POF se pueden clasificar en aquellas que tienen un origen intrínseco o extrínseco. Los mecanismos de origen intrínseco dependen de la propia constitución de la fibra y por tanto no pueden reducirse. Los mecanismos de origen extrínseco pueden reducirse ya que están relacionados con el procesado del material, y depende del proceso de fabricación. Algunos ejemplos de estos mecanismos son el envejecimiento o el tendido de la fibra.

## I.2.2 Dispersión

La capacidad de la fibra óptica de transmitir elevadas tasas de datos es una de las características que la hacen especialmente valiosa a la hora de ser utilizada en redes LAN.

Esta tasa de transmisión viene limitada por la dispersión temporal que a su vez está causada por las características dispersivas de la fibra sobre la señal en el transcurso de la distancia. Esta dispersión provoca el ensanchamiento de los impulsos a medida que se propagan en su recorrido y en consecuencia deforman de los mismos, acarreando errores que provocan errores en recepción.

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

Dispersión material: tipo de dispersión que se refiere a lo que ocurre en cada modo por lo que también se denomina intramodal. Cada modo propaga todas las líneas espectrales correspondientes a las longitudes de onda del emisor a la tasa de transmisión que corresponde a cada una de estas longitudes. El hecho de que en cada modo tengamos una tasa de transmisión distinta originará este tipo de dispersión.

Dispersión intermodal: tipo de dispersión que afecta a las relaciones entre los distintos modos. Las distintas velocidades y direcciones asociadas a las longitudes de onda que penetran en la fibra pueden permitir la propagación de diferentes modos. El número de modos será tanto mayor cuanto mayor sea la libertad de recorridos y por tanto cuanto mayor sea el diámetro del núcleo. Esto implica que dos rayos de igual longitud de onda que incidan simultáneamente en la fibra pero con direcciones distintas llegaran en instantes diferentes al extremo receptor dependiendo del modo en el que se propaguen y generarán este tipo de dispersión.

## I.3 Estructura de la fibra óptica

Definimos fibra óptica como una guía de ondas cilíndrica por la cual se transmite luz guiada. Toda fibra óptica tiene 3 capas diferenciadas:

- Núcleo: capa interna por la cual viaja la luz. El índice de refracción de esta capa puede ser de tipo salto de índice (SI), gradual (IG) o multiescalón (IME). Dependiendo del tipo de núcleo podremos definir distintos tipos de fibra óptica.
- Revestimiento: capa que recubre al núcleo. Tiene un índice de refracción constante y menos al de este para evitar que la luz se escape.

- Cubierta: capa externa que protege la fibra ante factores externos y le da robustez.

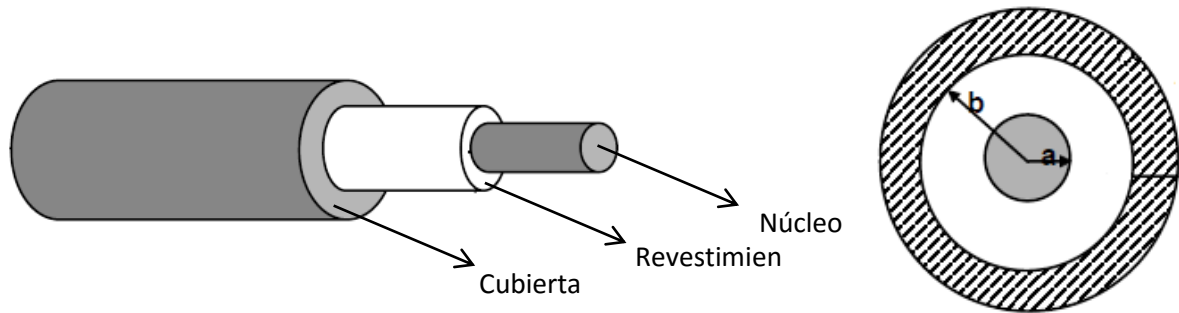


Figura I.2 Estructura de una fibra óptica

En la anterior figura podemos observar las distintas capas descritas así como una aproximación de los diámetros de cada una de ellas. Comprobamos que el área del corte transversal por el cual se transmite la luz (núcleo) es mucho menor que el área que conforman el revestimiento y la cubierta.

## I.4 Tipos de fibra óptica

Existen múltiples formas de clasificar la fibra óptica según su tamaño, tipo de núcleo, material del núcleo, del número de estos o incluso del número de modos que transmite.

Según el tipo de material del núcleo definimos la fibra de vidrio (GOF) cuyo núcleo oscila entre 3 y 25  $\mu\text{m}$  y la fibra de plástico (POF) en cuyo caso oscila entre 125 y 490  $\mu\text{m}$ .

Por otro lado según el número de modos que se transmiten por ella definimos la fibra monomodo si solo se transmite el modo fundamental o la fibra multimodo en caso de que se transmitan más de un modo. Esta clasificación nos será especialmente útil en la GOF ya que en la POF, debido a su gran tamaño y amplia apertura, el número de modos que transmite es del orden de millones.

Si nuestro criterio de clasificación es el número de núcleo que posee la fibra podemos diferenciar las mononúcleo y las fibras multinúcleo. Un ejemplo de estas es la MC-POF. En ella los distintos núcleos se disponen ordenados por anillos alrededor de un núcleo central como vemos en la figura.

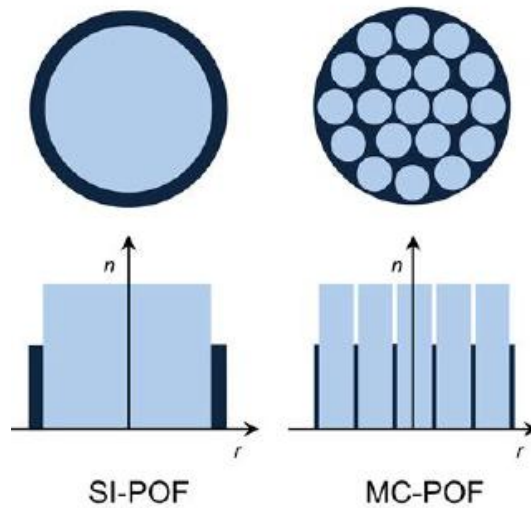


Figura I.3 Distribución de los núcleos de una fibra de un núcleo (izquierda) y multinúcleo (derecha)

Finalmente una de las clasificaciones que a nosotros más nos interesa es aquella en la que agrupamos las POFs en función de cómo se comporta el índice de refracción en el núcleo.

### SI-POF

En este tipo de fibras el índice de refracción del núcleo es uniforme en todo el núcleo así como en el revestimiento y que el índice de este es menor al del núcleo para que el haz quede guiado de la mejor forma posible.

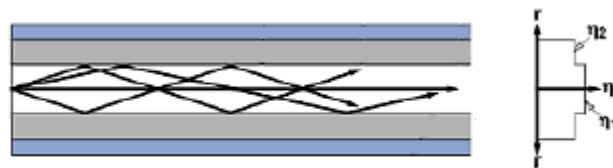


Figura I.4 Propagación de la luz de una fibra SI-POF

Esta característica del núcleo hace que exista un compromiso entre facilidad de inyección de la luz, atenuación ancho de banda y velocidad de transmisión. Además de esto la fibra de salto de índice posee una alta apertura numérica (NA) lo que otorgará a la fibra de mayor facilidad para captar la luz pero también limitará tanto el ancho de banda como la velocidad de transmisión.

## GI-POF

En este tipo de fibra de índice gradual el índice de refracción varía progresivamente en función del radio de la fibra, siendo ligeramente mayor en el centro de ésta.

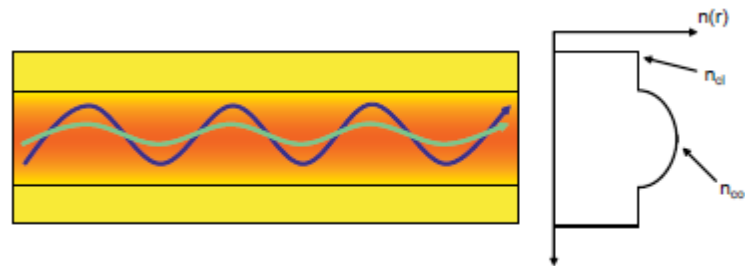


Figura I.5 Propagación de la luz en una fibra GI-POF

Con esta modificación de las características del núcleo conseguimos reducir notablemente el efecto de la dispersión modal que se producía el SI-POF por el retardo entre rayos debido a la diferencia de caminos que existía entre ellos. De este modo es posible conseguir mayores anchos de banda que con SI-POF y por tanto mayores tasas de transmisión. La desventaja es que la apertura numérica disminuye y por tanto disminuye con ella la facilidad de inyección.



## Anexo II. Preparación de la fibra

---

Durante las medidas experimentales vamos a trabajar con dos tipos de fibras cuya preparación es totalmente diferente.

La preparación de la GOF consiste en un primer pelado con una peladora de tipo MSI de 0.04 de diámetro mostrada en la Figura II.1 (izquierda) con el que eliminaremos el recubrimiento de acrilato. Una vez pelado limpiaremos la punta de la fibra con alcohol para eliminar toda aquella impureza producida por el pelado. Finalmente realizaremos el corte de la fibra con la cortadora de la Figura II.2 (derecha). Para realizar un buen corte realizaremos primero una pequeña incisión perpendicular en la fibra y después la sometemos a una tensión que provocará una fractura de los enlaces atómicos en la dirección del corte y que nos dará como resultado un corte limpio y transversal.

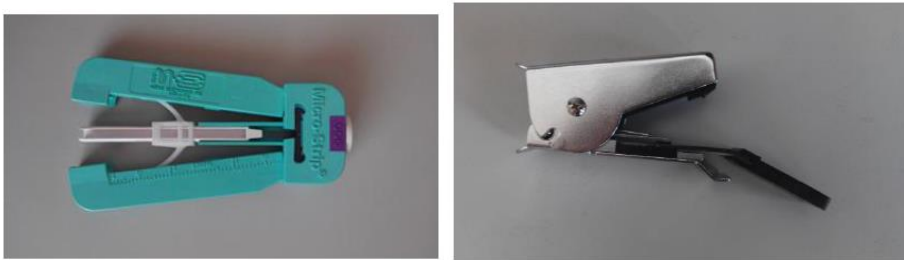


Figura II.1 Peladora y cortadora para el preparado de una fibra GOF

La preparación de la POF es diferente de la GOF dado que primero se realiza el corte y después el pelado. Después, realizaremos un pulido de la punta para eliminar las irregularidades. Para realizar el corte de la POF utilizaremos una cortadora Fiber Cutter [25] mostrada en la Figura II.2 (derecha). Posteriormente se retira el recubrimiento con una peladora Micro-Strip™ precisión stripper de tipo MSI mostrada en la Figura II.2 (izquierda) para dejar al descubierto la cantidad adecuada de fibra en función del conector o el sistema con el que se va a utilizar.

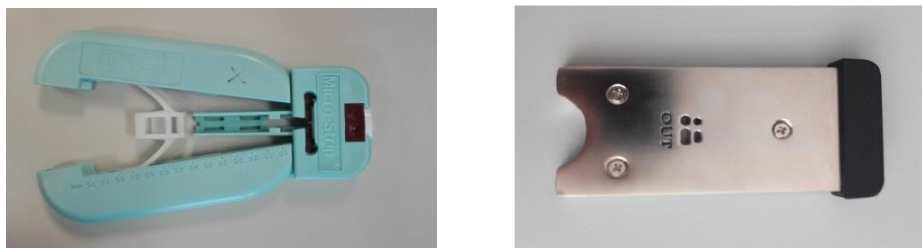


Figura II.2 Peladora y cortadora para el preparado de una fibra POF

Tras el pelado es conveniente realizar un pulido de ambos extremos de la POF para dejar uniformizar su superficie lo que aumenta la potencia inyectada y facilita el alineamiento. Este pulido se realiza utilizando las dos lijas mostradas en la Figura II.3 junto con una base de cristal y el conector adecuado para el tipo de fibra que vamos a pulir (conector VersaLink).



Figura II.3 Lijas utilizadas para el pulido de una fibra POF

El proceso de pulido consiste en impregnar las lijas con el líquido de pulido y realizar repeticiones de movimientos curvos en forma de ‘8’ como se muestra en la Figura II.4. Para realizar un buen pulido realizaremos dichos movimientos primero sobre la lija de grano duro (papel de pulir 2000-grit) y después sobre la de grano fino ( $3\mu\text{m}$ ).

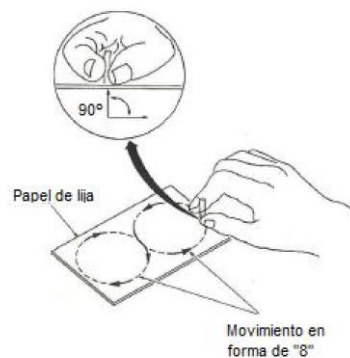


Figura II.4 Proceso de pulido de una fibra POF

Este proceso manual tiene el inconveniente de que si el soporte de fibra se manipula con una cierta inclinación la superficie de ésta puede quedar con un pequeño ángulo remanente en lugar de completamente perpendicular a su eje.

# Anexo III. Entorno de medidas de FFPs (LabVIEW)

El entorno de desarrollo LabVIEW™ es una plataforma fundamental para la toma de medidas del montaje experimental. Para nuestro propósito utilizaremos un programa de LabVIEW™ que se diseñó en un proyecto anterior. El programa MedidasAngulares.vi es el encargado tanto de controlar el motor como de registrar los FFPs.

La utilidad principal de este programa es realizar barridos angulares aunque, dado que permite extraer FFPs individuales, nos permitirá realizar también barridos longitudinales.

La interfaz de *MedidasAngulares.vi* se muestra en la siguiente figura.

Controles del

programa

Directorio

Prefijo y  
fichero

Distancia fibra

Posición del  
motor

Correcciones

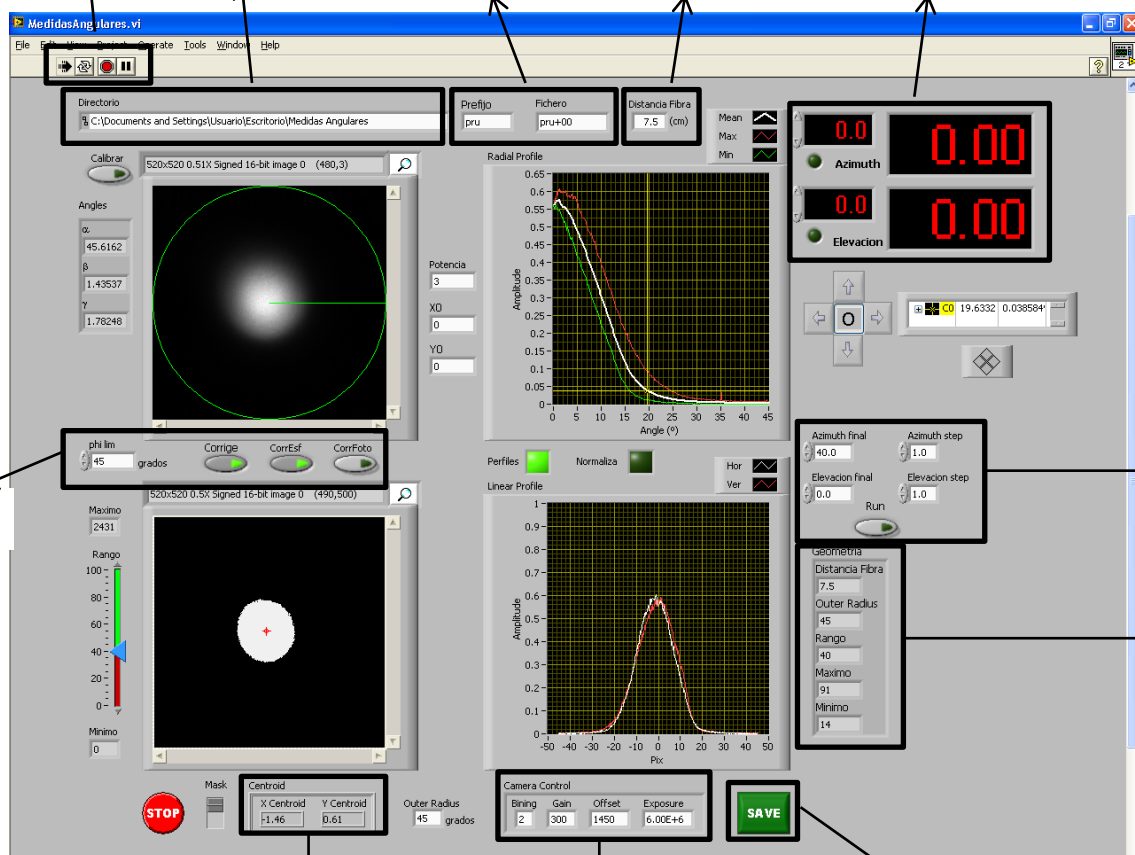
Configuración  
del barrido

Geometría

Centroide

Control de  
cámara

Botón SAVE



La interfaz nos muestra en tiempo real el perfil radial calculado a partir de la imagen captada por la cámara refrigerada. En la imagen superior izquierda se muestra la imagen tal y como está siendo captada por la cámara y debajo de ella se muestra la misma imagen umbralizada. En la imagen superior derecha se muestran los perfiles radiales máximo, promedio y mínimo. Debajo de ella se muestra el mismo perfil simetrizado respecto a  $\theta_{out} = 0^\circ$ .

Estos perfiles radiales son los que guardaremos automáticamente al hacer un barrido angular o de forma manual. Cada vez que un perfil radial sea guardado se generarán 3 ficheros:

- Un fichero con la extensión .dat en el que guardaremos los perfiles radiales máximo, promedio y mínimo que se mostraban en la imagen superior derecha.
- Un fichero con la extensión .tiff en el que guardamos la imagen del perfil radial.
- Un fichero con la extensión .cfg en el que guardamos toda la información de configuración de la medida como el tiempo de exposición o la posición del centroide.

En la interfaz aparte de las cuatro imágenes explicadas existen una gran cantidad de controles que nos permiten configurar el barrido.

- Controles del programa: controles utilizados para iniciar o parar la conexión del programa con la cámara y el motor.
- Directorio: indica la carpeta en la que se guardarán los archivos
- Prefijo y fichero: el campo prefijo indica la parte del nombre que todos los ficheros que guardemos compartirán. *Fichero* es un campo que se forma automáticamente con el prefijo seguido de un número con signo que indica el ángulo  $\theta_{in}$  con el que estamos inyectando. En caso de realizar un barrido angular el prefijo será constante y el nombre del fichero se cambiará automáticamente dependiendo de  $\theta_{in}$ . Sin embargo cuando realizamos los barridos longitudinales siempre estamos inyectando con  $\theta_{in} = 0$  por lo que el nombre del fichero sería siempre el mismo. Para solucionarlo cambiaremos el nombre del prefijo de forma manual posición longitudinal, de modo que el nombre de nuestros ficheros estará compuesto por un prefijo que incluye el valor numérico con signo de la posición longitudinal de inyección y “+00”, que indica que siempre estamos inyectando en el ángulo  $0^\circ$ .
- Distancia fibra: valor que nos permite especificar la distancia entre la pantalla y el extremo de la fibra y que en nuestro caso es de 7.5 cm. Este valor es muy

importante porque permite al programa obtener el perfil radial en función del ángulo de salida a partir de la imagen.

- Posición del motor: esta parte del interfaz es la encargada de controlar la base motorizada. La zona tiene dos partes diferenciadas: la superior corresponde con el control del Azimuth y la inferior corresponde al control de la elevación. Ambos funcionan de la misma forma aunque en nuestro caso solo utilizaremos el azimuth. Para mover la base rotatoria de forma manual podemos usar tantas las flechas a la izquierda de los displays como teclear el valor numérico de la posición a la que nos queremos mover.
- Correcciones: permite seleccionar los parámetros para que se realice la corrección de la imagen producida porque el eje de la cámara forma un ángulo  $45^\circ$  con respecto a la pantalla.
- Centroide: indica el punto central para el cálculo del perfil radial. Muestra tanto la coordenada X e Y calculadas a partir del promedio de todos los puntos registrados por la cámara superiores a un cierto umbral. El centrado del extremo de la fibra enfrenteado a la pantalla se realiza ajustando los valores de las coordenadas del centroide lo más cercano a (0,0) posible.
- Control de cámara: parámetros de ajuste de la cámara QICAM como la ganancia, offset y exposición. En nuestro caso el offset es de 1450 y ajustaremos el tiempo de exposición para cada medida de forma que el perfil radial tenga una amplitud cercana al máximo sin saturar para ninguno de los ángulos del barrido. Los parámetros Bining y Gain los dejaremos constantes durante todas las medidas.
- Geometría: muestra los diferentes datos referentes a la geometría como la distancia a la fibra, el ángulo máximo de giro del motor,...
- Configuración del barrido: muestra los valores relativos a los barridos angulares. En ellos se especifica, tanto para el barrido en azimuth como en elevación, el intervalo de posiciones a barrer y el paso del barrido. En nuestro caso el barrido será entre  $-40^\circ$  y  $40^\circ$  y el paso será de  $1^\circ$ . Además en esta sección del interfaz se incluye el botón RUN que pulsaremos una vez que todos los parámetros sean los correctos para comenzar el barrido.
- Botón SAVE: botón encargado de guardar de forma manual el perfil radial actual. Este botón nos será de gran utilidad cuando realicemos los barridos longitudinales ya que este tipo de barrido no está implementado en el programa y los diferentes perfiles radiales se tienen que guardar de forma manual.



## Anexo IV. Programas desarrollados en el proyecto (Matlab)

---

La herramienta fundamental para el procesamiento de todos los datos extraídos del software de LabVIEW™ es el software de Matlab™. A continuación se enumeran todos los scripts elaborados junto con una breve descripción:

### Barridos angulares

- process\_barridoangular.m : toma los datos de un barrido angular a partir de los diferentes archivos .dat que el software de Matlab genera y elabora una matriz con el valor de la medida para cada punto  $(\theta_{iny}, \theta_{out})$ .
- Comparar\_barridoangular.m : para un grupo de barridos angulares carga las distintas matrices generadas por process\_barridoangular.m junto los tiempos de exposición correspondientes y permite extraer una figura que compara todas las matrices.

### Barrido longitudinal

- process\_barridox.m : toma los datos de un barrido longitudinal a partir de los diferentes archivos .dat que el software de Matlab genera y elabora una matriz con el valor de la medida para cada punto  $(x, \theta_{out})$ .
- comparar\_barridox.m : para un grupo de barridos longitudinales carga las distintas matrices generadas por process\_barridox.m junto con sus tiempos de exposición. De dichas matrices nos permite extraer parámetros como la anchura efectiva, la potencia total, la anchura del perfil radial, el valor del máximo de cada perfil radial o su posición así como obtener las imágenes que los comparan.

### Modelo matricial de presión

- MatrizPressGH.m : programa que nos permite cargar las matrices obtenidas con y sin presión para una o varias medidas de la fibra GH-POF con el fin de realizar el ajuste de parámetros que determinan el modelo matemático tanto de la parte positiva de la medida como de la negativa. Los parámetros del modelo matemático se guardan en un fichero .xls para cada una de las medidas.

- goal3GH.m & goal3GI.m: función invocada por MatrizPressGH.m o MatrizPressGI.m a través de fminsearch que nos devuelve los parámetros que minimizan el error entre la medida simulada y la experimental con presión para las fibras GH-POF o GI-POF respectivamente.
- MatrizPressGI.m : programa que nos permite cargar las matrices con y sin presión para una o varias medidas realizadas para la fibra GI-POF con el fin de obtener el modelo matemático tanto de la parte positiva de la medida como de la negativa. Los parámetros del modelo matemático para cada una de las medidas se guardan en un fichero .xls.
- ModeloMatemáticoFinalGH.m & ModeloMatemáticoFinalGI.m : programas que extraen los parámetros del fichero .xls para obtener por un lado el modelo matemático promedio y por otro obtener las medidas simuladas tanto con el modelo individual como con el promedio para cada una de las fibras. Además nos permite calcular los errores cometidos con cada uno de los modelos y compararlos.
- AplicarGHaHP.m : programa que una vez obtenido el modelo promedio de ModeloMatemáticoFinalGH.m nos permite aplicarlo a las medidas de referencia de HFBR-POF para comprobar cómo se comporta dicho modelo y poder decidir si el modelo de una fibra SI-POF puede extrapolarse a otras fibras SI-POF.

## Otros programas

- medidorpresion.m : programa que recoge los datos de la caracterización de la presión del correspondiente fichero .xls para obtener la caracterización promedio y extrapolarla a valores de peso mayores que los medidos en la caracterización.
- PerdidasLED.m : programa que recoge los datos del experimento con el Kit Fotec del Capítulo 4 del correspondiente fichero .xls para obtener la curva de la atenuación frente al peso con la finalidad de poderla compara con las pérdidas obtenidas en los modelos.

Estos son los programas más relevantes utilizados. A parte de estos programas existen otros que tienen como finalidad cargar distintos resultados de los programas descritos anteriormente para representarlos conjuntamente o compararlos entre sí.



# Anexo V: Hojas de características

---

Este anexo consta de las hojas de características tanto de las fibras de vidrio o plástico utilizadas como de los instrumentos de captura y control empleados.

V.1 Fibra monomodo de visible: Fibra Corning RGB 400 – Monomodo de visible

V.2 Fibra GH-POF: Eska<sup>TM</sup> Mitsubishi GH-4001

V.3 Fibra HP-POF: HFBR-R Avago Technologies

V.4 Fibra GI-POF: OM-Giga-SE100 FiberFin

V.5 Cámara refrigerada: QICAM-Fast 1394 de 12 bits

V.6 Medidor de presión: Force Sensing Resistor 400 Series

V.7 Kit Fotec para fibra óptica

## V.1 Fibra Corning RGB 400 – Monomodo de visible

### Corning® RGB 400 Specialty Optical Fiber

CORNING



*Optimized  
for visible  
light spectral  
range  
applications*

*Corning RGB 400 Specialty Fiber is a single-mode fiber that is optimized for visible operating wavelength applications. The fiber's short cut-off wavelength design enables single-mode operation in the visible wavelength range. Outside Vapor Deposition (OVD) processing is used to fabricate this fiber, providing consistent geometric properties and high strength. In addition to exceptional performance as a single-mode visible fiber, the design is also optimized to produce low loss fused biconic tapered couplers.*

#### Applications:

- Blue lasers
- Sensors
- Photolithography
- Red-Green-Blue components
- Couplers
- Diode pigtails
- High resolution display

#### Features:

- Outstanding consistency and uniformity using Corning's patented Outside Vapor Deposition (OVD) process
- Dual acrylate coating system provides excellent protection from microbend-induced attenuation and superior mechanical robustness
- Profile optimized for adiabatic taper loss
- Excellent geometry control
- High reliability

## RGB 400

### Key Optical Specifications

Operating Wavelength (nm)	450 - 700
Fiber Cutoff Wavelength (nm)	400 $\pm$ 50
Maximum Attenuation @ 500 nm (dB/km)	$\leq$ 30
Maximum Attenuation @ 600 nm (dB/km)	$\leq$ 20
Mode-field Diameter @ 500 nm* ( $\mu$ m)	3.2 $\pm$ 0.5
Mode-field Diameter @ 600 nm* ( $\mu$ m)	3.9 $\pm$ 0.5

### Key Geometric, Mechanical and Environmental Specifications

Cladding Outside Diameter ( $\mu$ m)	125 $\pm$ 0.5
Coating Outside Diameter ( $\mu$ m)	245 $\pm$ 10
Core-to-Cladding Offset ( $\mu$ m)	$\leq$ 0.3
Standard Lengths	500 m, 1 km, 2 km, 5 km
Proof Test (kpsi)	100 or 200
Operating Temperature ( $^{\circ}$ C)	-60 to 85

### Performance Characterizations\*

Numerical Aperture	0.12
Index of Refraction	1.46
Core Diameter ( $\mu$ m)	4.0

\* Values in this table are nominal or calculated values

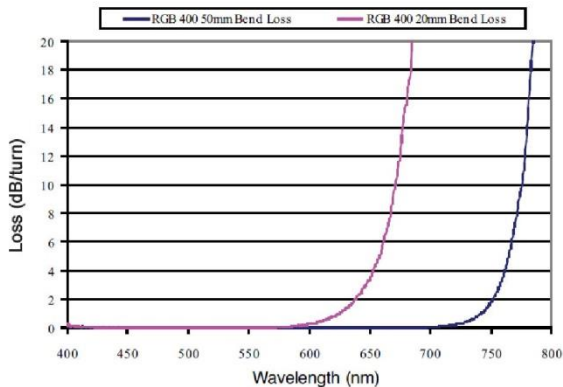


Figure 1

RGB 400 fiber bend loss at 20 mm and 50 mm diameters

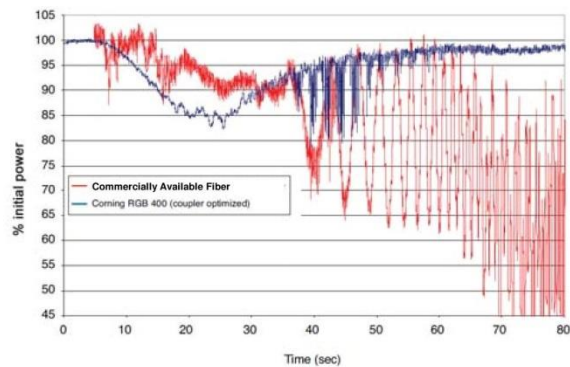


Figure 2

Single fiber taper loss pulls for RGB 400 and standard single-mode low wavelength fiber at 532 nm

For more information about Corning's leadership in Specialty Fiber technology visit our website at [www.corning.com/specialtyfiber](http://www.corning.com/specialtyfiber)

To obtain additional technical information, an engineering sample or to place an order for this product, please contact us at:

**Corning Incorporated** Tel: +1-607-974-9974  
Fax: +1-607-974-4122  
E-mail: [specialtyfiber@corning.com](mailto:specialtyfiber@corning.com)

© 2010 Corning Incorporated



## V.2 Fibra Eska™ Mitsubishi GH-4001

No. DPF1212-17

### 1.Scope

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

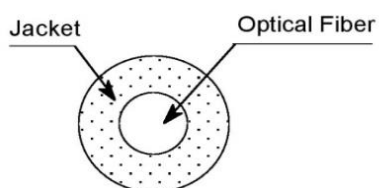
### 2.Structure

Table1

		GH 4001			
Item		Specification			
		Unit	Min.	Typ.	Max.
Optical Fiber	Core Material	—	Polymetyl - Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Polymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Refractive Index Profile	—	Step Index		
	Numerical Aperture	—	0.5		
	Core Diameter	μm	920	980	1,040
	Cladding Diameter	μm	940	1,000	1,060
Jacket	Material and Color	—	Polyethylene		
	Diameter	mm	2.13	2.20	2.27
	Indication on the Jacket	—	ESKA PREMIER ; Pink color		
Approximate Weight		g / m	4		

ESKA PREMIER :Pink color

Sectional View



## 3.Performance

No. DPF1212-17

Table2

GH 4001

Item		Acceptance Criterion and / or [Test Condition ]	Specification			
			Unit	Min.	Typ.	Max.
Maximum Rating	Storage Temperature	No Physical Deterioration [ in a Dry Atmosphere ]	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature	No Deterioration in Optical Properties* [ in a Dry Atmosphere ]	°C	- 55	—	+ 85
	Operation Temperature in a Moist Atmosphere	No Deterioration in Optical Properties** [ under 95 %RH ]	°C	—	—	+ 75
Optical Properties	Transmission Loss	φ50 nm Collimated Light ]	dB/km	—	—	170
	Transmission Loss under 95 %RH	φ50 nm Collimated Light ]	dB/km	—	—	190
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss Increment =< 0.5 dB [ A Quarter Bend ]	mm	25	—	—
	Repeated Bending Endurance	Loss Increment =< 1 dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	Times	10,000	—	—
	Tensile Strength	[Tensile Force at 5Åi Elongation; in Conformity to the JIS C 6861 ]	N	70	—	—
	Twisting Endurance	Loss Increment =< 1 dB [ Sample Length : 1 m Tensile Force : 4.9 N ]	Times	5	—	—
	Impact Endurance	Loss Increment =< 1 dB [ in Conformity to the JIS C 6861 ]	N.m	0.4	—	—

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

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

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

The specification is subject to change without notice.

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

## V.3 Fibra HFBR-R Avago Technologies

### HFBR-RXXYYY Series (POF)

### HFBR-EXXYYY Series (POF)

Plastic Optical Fiber Cable and Accessories  
for Versatile Link

## Data Sheet



### Cable Description

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

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

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

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

### Features

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

### Applications

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

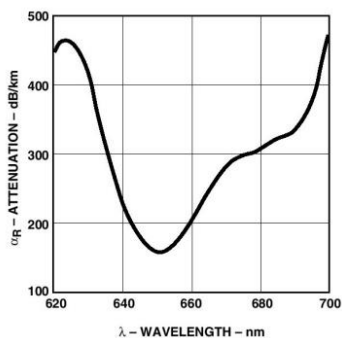


Figure 1. Typical POF attenuation vs. wavelength.

## Plastic Optical Fiber Specifications: HFBR-R/EXXYYY

### Absolute Maximum Ratings

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

### Mechanical/Optical Characteristics, $T_A = -40$ to $+85^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

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

#### Notes:

1. Installation temperature is the range over which the cable can be bent and pulled without damage. Below  $-20^\circ\text{C}$  the cable becomes brittle and should not be subjected to mechanical stress.
2. Short Term Tensile Force is for less than 30 minutes.
3. Short Term Bend Radius is for less than 1 hour nonoperating.
4.  $90^\circ$  bend on 25 mm radius mandrel. Bend radius is the radius of the mandrel around which the cable is bent.
5. Typical data are at  $25^\circ\text{C}$ .
6. Propagation delay constant is the reciprocal of the group velocity for propagation delay of optical power. Group velocity is  $v=c/n$  where  $c$  is the velocity of light in free space ( $3 \times 10^8$  m/s) and  $n$  is the effective core index of refraction.
7. Note that  $\alpha_R$  rises at the rate of about  $0.0067$  dB/ $^\circ\text{C}$ , where the thermal rise refers to the LED temperature changes above  $25^\circ\text{C}$ . Please refer to Figure 1 which shows the typical plastic optical fiber attenuation versus wavelength at  $25^\circ\text{C}$ .



## V.4 Fibra OM-Giga-SE100 FiberFin

# FiberFin®

### OM-Giga-SE100

*Graded-Index Plastic Optical Fiber*



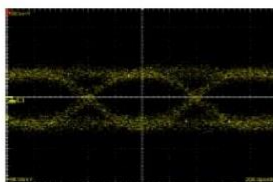
OM-Giga is a poly (methyl methacrylate)-based GI-POF for high-speed short-distance data-communication applications. It does not contain any refractive-index modifying dopant, and has excellent mechanical properties and thermal stability.

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

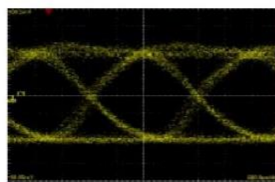
Property	Unit	SE-100	Remarks
Fiber Diameter ( <b>core</b> )	mm	1.00 ( <b>0.9</b> )	
Variation of Fiber Diameter	%	$\pm 5$	
Jacket Diameter	mm	2.2	
Variation of Jacket Diameter	%	$\pm 5$	
Jacket Material		Polyethylene	Black
Type of cable		Simplex	
Tensile Strength	N	> 70	at break
Bending Radius	mm	25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

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

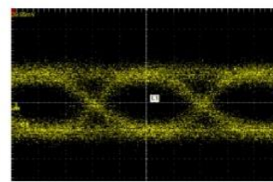
Eye – Pattern (Jacket Fiber)



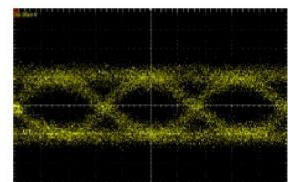
(a) 1 .25 Gbps Back to Back



(b) 1 .25 Gbps After 50m



(c) 1 .25 Gbps After 100m



(c) 1 .5 Gbps After 100m

**For additional information or to purchase the product, please contact**

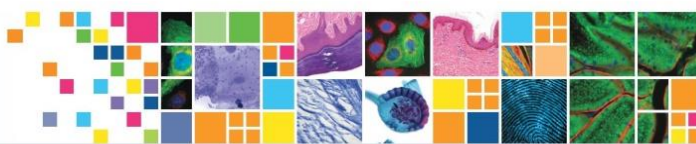
FiberFin, Inc. ([www.fiberfin.com](http://www.fiberfin.com))  
201 Beaver Street,  
Yorkville, Illinois USA  
Sales 630-553-6924  
Fax: 630-553-9025



## V.5 Cámara QICAM-Fast 1394 de 12 bits



DIGITAL IMAGING MADE EASY



PRODUCT DATASHEET

### QICAM *FAST1394*

### High-Performance Digital CCD Camera



#### High-Performance IEEE 1394 FireWire™ Digital CCD Camera

#### Monochrome or Color

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



#### applications

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

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

# QICAM Specifications

## ccd sensor

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

## camera

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

## camera models

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

### ■ Monochrome QICAM Cooled

Model: QIC-F-M-12-C

### ■ Monochrome QICAM Non-Cooled

Model: QIC-F-M-12

CCD Digital Camera, 12 Bits

### ■ Color QICAM Cooled

Model: QIC-F-CLR-12-C

### ■ Color QICAM Non-Cooled

Model: QIC-F-CLR-12

CCD Digital Camera, 12 Bits

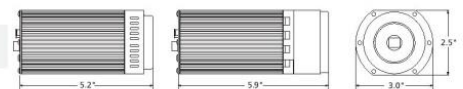
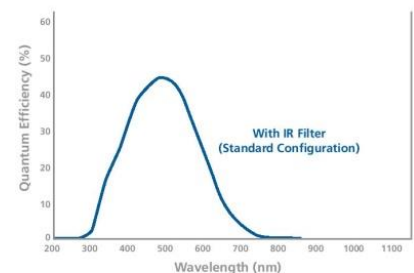
## camera options

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



- Extended Warranty

## spectral response



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

\*Refer to Qimaging website for detailed listing of supported operating systems.

Note: Specifications are typical and subject to change.

QICAM is a trademark of Qimaging Corporation.

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

QL\_QICAM\_DS\_Rev\_A7

## V.6 Medidor de presión FSR 400 Series



# FSR® 400 Series Data Sheet

Force Sensing Resistors®

### Features and Benefits

- Actuation force as low as 0.2N and sensitivity range to 20N
- Cost effective
- Ultra thin
- Robust; up to 10M actuations
- Simple and easy to integrate

### Description

Interlink Electronics FSR 400 Series is part of the single zone Force Sensing Resistor family. Force Sensing Resistors, or FSR's, are robust polymer thick film (PTF) devices that exhibit a decrease in resistance with increase in force applied to the surface of the sensor. This force sensitivity is optimized for use in human touch control of electronics devices such as automotive electronics, medical systems, industrial and robotics applications.

The FSR 400 Series sensors come in six different models with four different connecting options. A battery operated demo is available. Call us for more information at +1 805-484-8855



FSR® 400 Short  
5mm Circle x 20mm



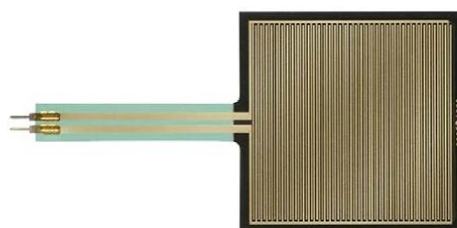
FSR® 400  
5mm Circle x 38mm



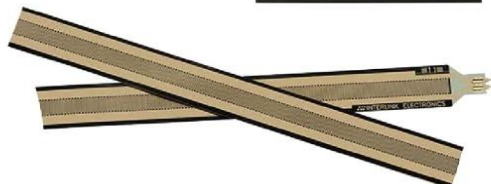
FSR® 402 Short  
13mm Circle x 25mm



FSR® 402  
13mm Circle x 56mm



FSR® 406  
38mm Square x 83mm



FSR® 408  
10mm Square x 622mm strip

P/N: PDS-10004-B

Human-Machine Interface Solutions for a Connected World



# FSR® 400 Series Data Sheet

Force Sensing Resistors®

## Device Characteristics

Actuation Force*	~0.2N min
Force Sensitivity Range*	~0.2N – 20N
Force Resolution	Continuous (analog)
Force Repeatability Single Part	+/- 2%
Force Repeatability Part to Part	+/- 6% (Single Batch)
Non-Actuated Resistance	>10 Mohms
Hysteresis	+10% Average (RF+ - RF-)/RF+
Device Rise Time	< 3 Microseconds
Long Term Drift 1kg load, 35 days	< 5% log10(time)
Operating Temperature Performance Cold: -40°C after 1 hour Hot: +85°C after 1 hour Hot Humid: +85°C 95RH after 1 hour	-5% average resistance change -15% average resistance change +10% average resistance change
Storage Temperature Performance Cold: -25°C after 120 hours Hot: +85°C after 120 hours Hot Humid: +85°C 95RH after 240 hours	-10% average resistance change -5% average resistance change +30% average resistance change
Tap Durability Tested to 10 Million actuations, 1kg, 4Hz	-10% average resistance change
Standing Load Durability 2.5kg for 24 hours	-5% average resistance change
EMI	Generates no EMI
ESD	Not ESD Sensitive
UL	All materials UL grade 94 V-1 or better
RoHS	Compliant

Specifications are derived from measurements taken at 1000 grams, and are given as (one standard deviation/mean), unless otherwise noted.  
\*Typical value. Force dependent on actuation interface, mechanics, and measurement electronics.

# FSR® 400 Series Data Sheet

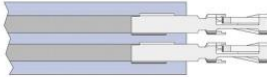
Force Sensing Resistor®

## Connector Information

Bare Tail



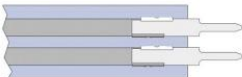
Female Tin Contacts  
PN: TE 2-487406-4



Female Tin Contacts with 2 Pin Housing  
PN: TE 2-487406-4  
PN: TE 487378-1



Solder Tabs  
PN: TE 1-88997-2



**Other Available Part Numbers:**  
Hardware Development Kit, PN 54-76247

## Application Information

For specific application needs please contact Interlink Electronics support team. An Integration Guide and Hardware Development Kit (HDK) are also available. FSR's are two-wire devices with a resistance that depends on applied force. Below is a force vs. resistance graph that illustrates a typical FSR response characteristic. Please note that the graph values are reference only and actual values are dependent upon actuation system mechanics and sensor geometry.

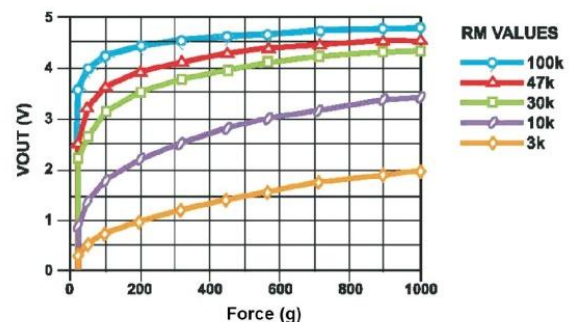
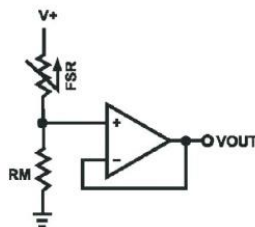
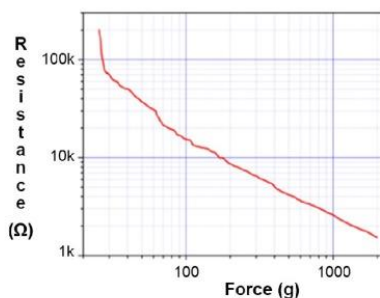
For simple force-to-voltage conversion, the FSR device is tied to a measuring resistor in a voltage divider (see figure below) and the output is described by the following equation.

$$V_{OUT} = \frac{R_M V_+}{(R_M + R_{FSR})}$$

In the shown configuration, the output voltage increases with increasing force. If RFSR and RM are swapped, the output swing will decrease with increasing force. The measuring resistor, RM, is chosen to maximize the desired force sensitivity range and to limit current. Depending on the impedance requirements of the measuring circuit, the voltage divider could be followed by an op-amp.

A family of force vs. VOUT curves is shown on the graph below for a standard FSR in a voltage divider configuration with various RM resistors. A V+ of 5V was used for these examples. Please note that the graph values are for reference only and will vary between different sensors and applications.

Refer to the FSR Integration Guide for more integration methods and techniques.



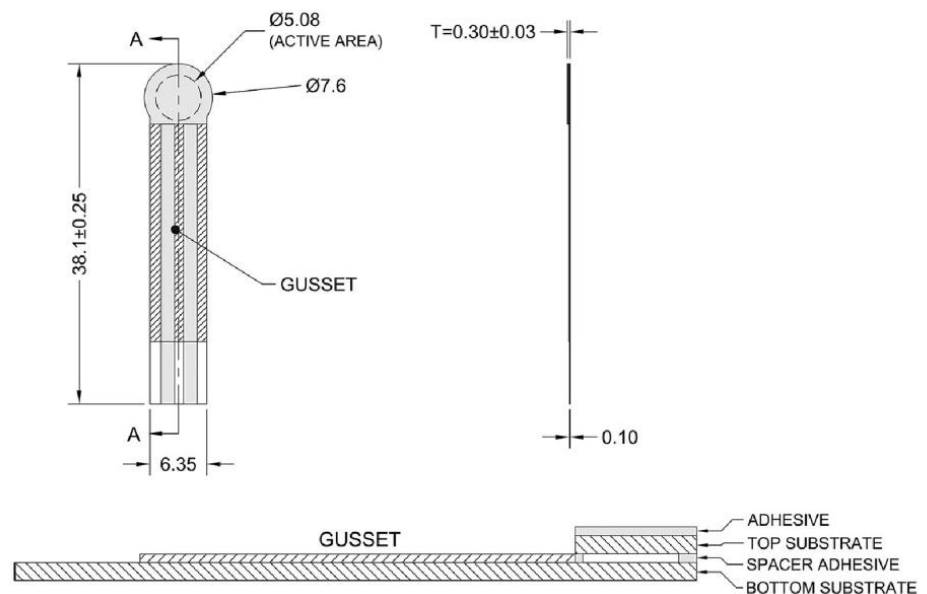
## Model 400:

Active Area:  $\varnothing 5.08\text{mm}$   
Nominal Thickness: 0.30mm  
Switch Travel: 0.05mm

## Available Part Numbers:

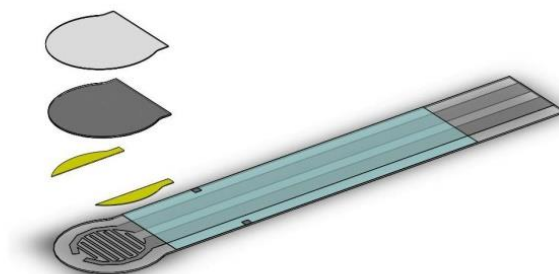
- PN: 34-00007 Model 400  
- No contacts or solder tabs
- PN: 34-00011 Model 400  
- with female contacts
- PN: 34-44001 Model 400  
- with female contacts and housing
- PN: 30-49649 Model 400  
- with solder tabs

## Sensor Mechanical Data



SECTION A-A  
LAYER STACK-UP

## Exploded View





## V.7 Kit Fotec para fibra óptica

**fotec** *the fiber optic test equipment company*

### Lite Fiber Optic Test Kits

#### Features

Includes Smart FO Power Meter and Mini LED or laser source

FOTest Lite Software for datalogging

Tests all networks and cable plants

New Versions for Gigabit Ethernet

Low Cost

#### Applications

Measure optical power or loss

Troubleshooting networks

The Fotec Lite Test Kit is the first low cost fiber optic test kit that offers PC interfacing and simple datalogging options. The T570 includes everything needed for testing multimode or singlemode fiber optic networks and cable plants, but costs much less than any comparable product.



The Fotec Lite Kit can offer high performance with low cost by combining a Fotec Smart FO power meter which includes data acquisition features with a low cost Mini source. The Lite Kit fits between the "no frills" Mini test kits and the highly versatile, automated Smart test kits from Fotec.

The Lite Kit includes a Fotec FM300 series FO power meter which is the most advanced handheld meter available. It uses digital signal processing (DSP) to allow switching display resolution from 0.1 to 0.01 dB when higher resolution is needed. It's RS232 interface plugs into any PC and the FOTest Lite software provided can bring data from the meter into the PC for storage, formatting into reports or printing. The T570 Lite Kit uses the FM310 Smart power meter (850,1300,1550nm) and the S770 Mini LED source(850,1300nm) for testing multimode fibers (and the 1300 can be used with singlemode fibers up to 5 km long.) A FOtracer is also included for visual tracing and continuity checking.

The T595 Lite Kit uses the S795 Mini laser source (1300,1550nm)with the FM310 Smart power meter(850,1300,1550nm) for singlemode fiber. The source also has 2 kHz modulation for use with fiber identifiers.

For short wavelength and plastic fiber applications the T565 uses the S765 Mini LED source(665,850nm) with the FM300 Smart power meter(665,790,850nm).

To allow simple data acquisition, the Fotec Lite Kit can output data to a personal computer. The Lite Kit includes FOTest Fotec's powerful fiber optic test software for fiber optic test data acquisition.

#### Ordering Guide

Test Kit	Meter	Source	Wavelengths	Fibers	Applications
T565	FM300	S765	665, 850	MM	Basic LAN/Datacom, POF
T570	FM310	S770	850, 1300	MM	Versatile LAN/Datacom
T580*	FM310	S770	850,1300 LED	SM & MM	Versatile LAN/Datacom Telco,CATV
		S780	1300 Laser		
T585*	FM310	S770	850,1300 LED	SM & MM	Versatile LAN/Datacom Telco,CATV
		S795	1300,1550 Laser		

T595*	FM310	S795	1300, 1550	SM	Telco,CATV
T1000-SX	FM310	S785	850 nm VCSEL	MM	Gigabit Ethernet
T1000-SLX	FM310	S785 S780	850 nm VCSEL 1300 nm Laser	SM & MM	Gigabit Ethernet

\*Specify Connector ST/SC/FC

### Smart Power Meters

Model	Detector	Cal Wavelengths(nm)	Operating Ranges
FM300	Silicon	665,790,850	+10 to -70 dBm
			0.001 w to 10mw
FM310	Germanium	850,1300,1550	+10 to -65 dBm
			0.001 w to 10mw

### Performance

Selectable resolution: 0.1 or 0.01 dB

Accuracy: +/-5%(W), +/-0.2 dB

(CATV : +/-0.4 dB) Calibrated to NIST Standards

Temperature coefficient: 0.1%/C

Operating temperature range:-10 to 50 C

Storage temperature range:-30 to 60 C

### Controls:

Power ON/OFF

Calibration wavelength (also selects display resolution)

Measurement ranges (also sets dB reference level)

**Computer interface:** RS-232 on RJ-11, 9600 baud

**Power:** 9v Battery life 20 hrs., input for AC adapter

### Minisources

Model	Wavelength	Type	Power(dBm)	Fiber	Connectors, comments
S760	665	LED	-20	POF	Modular adapter
S765	665 & 850	LED	-20	MM, POF	ST , incl. FOtracer
S770	850,1300	LED	-20	MM	ST
S779	790	Laser	-6	MM	FC conn only
S780	1300	Laser	-6	SM	ST/FC/SC, CW/2 kHz
S785	850	VCSEL	-6	MM	SC Gigabit & Ethernet
S790*	1550	Laser	-6	SM	ST/FC/SC, CW/2 kHz
S795*	1300 & 1550	Laser	-6	SM	ST/FC/SC, CW/2 kHz

\*Specify Connector ST/SC/FC

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

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



**Controls:**

Output power: adjustable, trimpot

OFF/Wavelength (LEDs)

OFF/CW/2kHz (Lasers)

Wavelength select (S795 only)

**Power:** 9V battery, 4 hr. life, Jack provided for AC adapter.

AC adapter Included : A108 (120VAC), A110 (220-240VAC)

(A108 is supplied with all laser sources and Test Kits)

**Size:** LED Sources 4.3 X 2.7 X 1.3 in (110 X 70 X 33mm)

Laser Sources: 4.3 X 2.7 X 1.8 in (110 X 70 X 46 mm)

**Weight:** 6 oz. (170 g) All specifications are typical at 25 deg. C. Fotec reserves the right to make engineering improvements or manufacturing refinements that may affect product specifications

**Made in USA.** All specifications are typical at 25 C. Fotec reserves the right to make engineering improvements or manufacturing refinements that may affect product specifications.

---

For Applications Assistance or Placing Orders:

Call 1-800-537-8254 toll free (US & Canada) 1-781-396-6155 elsewhere

FAX 1-781-396-6395

Send e-mail to [info@fotec.com](mailto:info@fotec.com)

[Request Literature](#) or [Request a Quotation](#)

[Return to the Fotec Home Page](#)

