



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería de Telecomunicaciones

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE CONECTORES SOBRE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO

Autora: Amanda Esteban Sánchez

Directora: M^a Ángeles Losada Binué

Zaragoza, diciembre de 2011



**Departamento de
Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad Zaragoza**

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mis padres, por todo el esfuerzo que hacen día a día para que mi hermano y yo podamos llegar cada vez un poco más lejos.

A Alberto, por confiar siempre en mí y haber soportado durante tantos años mis épocas de exámenes y mis malos humos.

A Javier y, especialmente, a M^a Ángeles, por todo lo que he aprendido de ellos este año, por sus consejos y sus ánimos en los momentos duros, y también, por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos.

GRACIAS A TOD@S

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE CONECTORES SOBRE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es la caracterización de conectores de fibras ópticas de plástico (*Plastic Optical Fibers*, POF) y el análisis de sus efectos sobre las propiedades de transmisión de este tipo de fibras. Esta caracterización se realiza mediante una matriz ya que la descripción de la propagación de potencia en la fibra se realiza mediante un modelo matricial previamente desarrollado. El cálculo de la matriz de propagación requiere la obtención de dos funciones que son características del tipo de fibra: la atenuación y difusión en función del ángulo de propagación.

Para poder estimar estas funciones de forma eficiente, se ha desarrollado en este proyecto un protocolo experimental basado en medidas del perfil de la distribución de potencia a la salida de un segmento corto de fibra, inyectando una fuente de luz colimada en distintos ángulos. Este método ha sido aplicado a POFs de salto de índice y 1 mm de diámetro de varios fabricantes, entre otras un nuevo tipo de fibra diseñado específicamente por la compañía Boeing para su uso en redes de comunicaciones dentro de aviones y que está preparada para soportar altas temperaturas.

Por otra parte, se han caracterizado dos tipos de conector: el Versalink (VL) y el ST que es similar al que se está diseñando en Boeing. Para realizar dicha caracterización ha sido necesario hacer una evaluación de las distintas herramientas de terminación comerciales para POF, con el fin de determinar la más adecuada para cada tipo de conector.

La caracterización de cada tipo de conector se ha realizado mediante un protocolo experimental similar al mencionado para la obtención de las funciones características de un tipo de fibra usando tramos cortos. Para obtener la matriz característica del conector, hemos modelado el efecto que tendría éste sobre la potencia como la que causaría una fibra de una cierta longitud y se han ajustado los parámetros de las funciones de atenuación y difusión a los resultados experimentales.

La validez del modelo conjunto fibra-conector se ha comprobado utilizando medidas de distribución angular de potencia y de anchos de banda en función de la longitud de fibra. Finalmente, se han realizado simulaciones para estudiar el impacto del conector en el comportamiento de una red de comunicaciones en función del tipo de fuente.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN...	5
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	9
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Objetivo del proyecto	11
1.2 Contenidos de la memoria.....	12
Capítulo 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS CONECTORES.....	15
2.1. Análisis de las herramientas de terminación.....	15
2.1.1 Selección de la herramienta de terminación.....	16
2.1.2 Análisis de las pérdidas de inserción de los conectores ST y VL.....	18
2.2 Protocolo experimental	21
2.2.1 Sistema experimental para la obtención de los FPPs.....	21
2.2.2 Resultados experimentales	23
2.3 Modelo del conector.....	24
2.3.1 Modelo de atenuación-difusión	25
2.3.2 Procedimiento de caracterización.....	26
2.3.2.1 Cálculo de la atenuación	27
2.3.2.2 Estimación de la difusión	28
2.4 Matrices de los conectores.....	29
Capítulo 3: MODELO MATRICIAL DEL SISTEMA FIBRA-CONECTOR.....	35
3.1 Modelo matricial de propagación de potencia óptica en fibras de plástico	35
3.2 Caracterización de fibras mediante medidas en tramos cortos	36
3.3 Validación del modelo conjunto con medidas con fibras cortas	38
3.3.1 Medidas de FFP con conector en fibras cortas.....	39
3.3.2 Medidas de potencia y ancho de banda en función de la longitud de fibra ...	40
3.3.2.1 Descripción del sistema experimental y medidas.....	40
3.3.2.2 Simulación y comparación	41
3.4 Impacto del conector en un enlace de POF	43
Capítulo 4: CONCLUSIONES.....	47
4.1 Aportaciones del PFC	47
4.2 Posibilidades de continuación y mejora del trabajo.....	48
4.3 Valoración del trabajo.....	48

Bibliografía y Referencias	51
Anexo I: LA FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO Y PARÁMETROS DE INTERÉS EN COMUNICACIONES ..	55
I.1 Fibra óptica de plástico de salto de índice	55
I.1.1 Materiales usados en POF	56
I.2 Características geométricas	57
I.3 Patrón de campo lejano	57
I.4 Atenuación	58
I.4.1 Causas de la atenuación	59
I.4.2 Espectros de atenuación	59
I.5 Dispersión y Ancho de Banda	60
I.6 Ancho de banda	61
Anexo II: MODELO MATRICIAL DE PROPAGACIÓN	63
Anexo III: SOFTWARE UTILIZADO	67
III.1 LabView™	67
III.2 Matlab™	68
III.2.1 Procesado de los datos experimentales de perfiles radiales	69
III.2.2 Modelo de propagación	69
III.2.3 Caracterización de fibras cortas	69
III.2.4 Obtención de los parámetros característicos del conector	69
III.2.5 Cálculo de la potencia y del ancho de banda	69
Anexo IV: INSTRUMENTOS, FIBRAS Y CONECTORES	71
IV.1 Cámara QICAM FAST 1394.....	72
IV.2 Mitsubishi, GH-4001	74
IV.3 Toray, PGU-FB1000.....	76
IV.4 Conector VL.....	78
IV.5 Conector ST.....	79
Anexo V: ARTÍCULO	81

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Conectores estudiados, ST y VL.....	16
Figura 2: Cortadora 1 (Professional Fiber Cutter)	17
Figura 3: Cortadora 2 (Disposable Fiber Cutter)	17
Figura 4: Cortadora 3 (Fiber Cutter).....	17
Figura 5: Ejemplo del movimiento del proceso de pulido	18
Figura 6: Pérdidas medias de los conectores ST y VL en las distintas fibras con las cortadoras 2 y 3 sin la mejora del pulido	19
Figura 7: Comparación de las pérdidas medias con y sin pulido de los conectores ST y VL con la cortadora 3 en las distintas fibras	19
Tabla 1: Desviación típica de las pérdidas para las tres fibras en las dos condiciones estudiadas.....	20
Figura 8: Sistema experimental.....	21
Figura 9: Ejemplo de conjunto de perfiles radiales.....	22
Figura 10: Muestra de una medida sin y con conector para las fibras estudiadas	23
Figura 11: Muestra de una medida sin y con conector para las tres fibras con el proceso de pulido	24
Figura 12: Medidas sin y con conector de la fibra EAA con el conector ST	26
Figura 13: Atenuaciones y atenuación promedio de la fibra EAA con el conector ST	28
Tabla 2: Difusión y errores obtenidos con la fibra EAA y el conector ST	28
Figura 14: Comparación de las medidas con conector, de las simulaciones de la matriz de conector propia de cada medida y de las simulaciones hechas con la matriz promedio	29
Figura 15: Atenuaciones promedio de las tres fibras con el conector ST con y sin pulir	30
Figura 16: Atenuaciones promedio de las tres fibras con el conector VL con y sin pulir.....	30
Figura 17: Comparación de las difusiones medias de las tres fibras con y sin el efecto del pulido	31
Tabla 3: Difusiones medias, desviaciones típicas y error promedio de las tres fibras con conector ST.....	32
Tabla 4: Difusiones medias, desviaciones típicas y error promedio de las tres fibras con conector VL.....	32

Figura 18: Matrices del conector ST con y sin el efecto del pulido.....	32
Figura 19: Matrices del conector VL con y sin el efecto del pulido.....	33
Figura 20: Matriz de inyección usada para la fibra EAA.....	37
Figura 21: Comparación de las medidas de 2.5, 5 y 10 metros con sus simulaciones.....	38
Tabla 5: Errores de los tramos sin conector.....	38
Figura 22: Comparación de las medidas de 2.5, 5 y 10 m con sus simulaciones	39
Tabla 6: Errores de las medidas de 2.5, 5 y 10 m con conector.....	40
Figura 23: Esquema del sistema experimental para obtener anchos de banda en POFs	41
Figura 24: Medidas de respuesta en frecuencia normalizadas para las tres condiciones señaladas.....	41
Figura 25: Medidas y simulaciones de ancho de banda en función de la longitud de fibra	42
Figura 26: Medidas y simulaciones de potencia en función de la longitud de fibra.....	43
Figura 27: Simulación de la atenuación y del ancho de banda en función de la longitud de fibra sin conector y con el conector ST insertado a 50 cm del emisor o a 50 cm del receptor .	44
Figura 28: Simulación de la capacidad del sistema en función de la longitud de fibra sin el conector y con el conector ST insertado a 50 cm del emisor o a 50 cm del receptor con una anchura de fuente de FWHM=30°	45
Figura 29: Estructura de una SI-POF.....	55
Figura 31: Estructura atómica del PMMA	56
Figura 30: Corte transversal de la SI-POF.....	56
Figura 32: Propagación de las ondas en el interior de una fibra óptica.....	57
Figura 33: Obtención del ángulo de aceptación.....	58
Figura 34: Espectros de atenuación de distintos tipos de PMMA-POF: SI, GI, PF.....	59
Figura 35: Diferencia de caminos entre rayos en SI-POF	61
Figura 36: Diferencia de caminos entre rayos en GI-POF	61
Figura 37: Definición de ancho de banda.....	62
Figura 38: Representación en imagen de la distribución de potencia espacio-temporal a la salida de una fibra PGU de 150 m y las integrales de potencia para el ángulo de salida y para el tiempo	66
Figura 39: Captura del programa LabView™.....	67

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Este proyecto fin de carrera se enmarca en la línea de investigación de fibras de plástico (POF) llevada a cabo dentro del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A. El subgrupo de POF se ocupa tanto de la caracterización experimental de estas fibras y dispositivos relacionados con ellos, como del modelado de sus propiedades y diseño de aplicaciones para redes de corto alcance tales como redes domésticas o redes en medios de transporte (1).

1.1 Objetivo del proyecto

En estos momentos, el subgrupo de POF está trabajando con investigadores y docentes de la City University of New York (CUNY), con el objetivo de posibilitar la utilización en un futuro de fibra de plástico en las redes de comunicaciones de los aviones de Boeing, para distribuir contenido multimedia dentro del aparato. Para lograr esta meta, es necesario introducir un modelo de este tipo de fibra en software comercial de diseño de redes ópticas. La mayor parte de los entornos de simulación presentan modelos de fibra monomodo estándar y de fibra multimodo de vidrio cuyas propiedades son muy diferentes a las de las fibras de plástico. Las fibras multimodo de vidrio son de bastante menor tamaño que las fibras de plástico y por tanto, son capaces de propagar un número de modos bastante menor. Esto permite un tratamiento matemático modelando grupos de modos, lo que no es posible en las fibras de plástico donde se propagan millones de ellos. De hecho, esto permite tratar los modos como un continuo y describir la propagación de potencia óptica en la fibra mediante una ecuación diferencial. En el grupo de POF de EINA, se ha abordado la resolución de esta ecuación utilizando un enfoque matricial y se ha desarrollado un modelo que describe la propagación de potencia en la fibra mediante una matriz (2). Este enfoque matricial, que ha sido validado previamente con resultados experimentales, es robusto y flexible para ser integrado en software comercial.

El diseño de una red dentro de un avión se caracteriza porque es necesaria la presencia de numerosos conectores, que se ha comprobado que imponen limitaciones a las propiedades de transmisión de la fibra (3)(4). Por ello, para configurar una red de este tipo, es necesario realizar un análisis previo de distintas configuraciones para determinar cuál es la óptima. El modelo matricial de propagación de POF permite la incorporación de efectos localizados o dispositivos de forma simple, siempre que éstos puedan ser modelados como matrices. Así pues, el objetivo principal del proyecto será el desarrollo de un método de caracterización de conectores de POF mediante una matriz que pueda incorporarse en el modelo de propagación desarrollado. En particular, se van a caracterizar dos tipos de conector: el conector VersaLink (VL) (18) y el conector ST (19), que es muy similar al que está desarrollando actualmente Boeing para su aplicación dentro del avión. Los efectos de estos conectores se analizarán para fibras de plástico de salto de índice y 1 mm de diámetro procedentes de diferentes fabricantes para evaluar si el tipo de fibra es un factor importante en la acción del conector.

El objetivo general del proyecto puede estructurarse en tres partes bien diferenciadas:

- Diseño y puesta a punto de un método experimental y de un modelo matricial para la caracterización de conectores.
- Desarrollo de un método experimental de obtención de los parámetros necesarios para la caracterización de fibra óptica de plástico utilizando segmentos cortos de fibra.
- Comprobación de la validez del modelo matricial de fibra y conector, contrastando simulaciones tanto de barridos del perfil de distribución de potencia como de la respuesta en frecuencia o ancho de banda con datos experimentales.

Como paso inicial para llevar a cabo estos objetivos, se realizará un estudio de las pérdidas de los dos tipos de conector analizando las diferentes herramientas de terminación disponibles, con el fin de valorar su influencia en la calidad de la conexión y determinar cuál es la más adecuada para cada tipo de fibra y conector. Una vez elegidas las herramientas idóneas, se utilizará un sistema experimental de registro de imágenes de patrón de campo lejano (*Far Field Pattern*, FFP) para distintos ángulos de inyección, automatizado mediante el entorno de programación Labview™ y ya desarrollado en un proyecto anterior (5). Las medidas experimentales de perfiles radiales extraídos de los patrones de campo lejano se utilizarán para caracterizar el conector, siguiendo un protocolo experimental diseñado con el fin de aislar sus efectos de los de propagación de la fibra (6). El conector se modelará mediante una matriz que se pueda introducir en el modelo matricial de propagación de potencia óptica en fibras ópticas de plástico (POFs) previamente desarrollado y testeado en el grupo de investigación (7)(8). Simultáneamente y basándonos también en medidas de barridos de perfiles radiales, se desarrollará un método experimental para obtener la matriz de propagación de las fibras. Este modelo, combinado con el modelo matricial del conector, se validará mediante comparación de simulaciones y medidas experimentales tanto de barridos de perfiles radiales como de ancho de banda en función de la longitud de fibra. Además, se demostrará la potencialidad del modelo conjunto para estudiar cómo cambian las propiedades de transmisión en una red de comunicaciones simple, dependiendo de la posición del conector.

1.2 Contenidos de la memoria

En las líneas siguientes se detalla la estructura de los contenidos de la memoria del proyecto:

- *Capítulo 1: Introducción*

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

- *Capítulo 2: Caracterización de conectores*

En primer lugar se hace un análisis de las herramientas de preparación de los extremos de la fibra en función de las pérdidas de potencia al insertar cada tipo de conector, valorando además de la calidad y repetitividad de la terminación resultante, su facilidad de manejo, la rapidez de la preparación, etc. Después se describe brevemente el sistema experimental de registro de imágenes de FFPs y extracción de los perfiles radiales, así como el protocolo

seguido para la obtención de medidas necesarias para la caracterización y mostrando los distintos resultados obtenidos. Para terminar, se describe el modelo de conector utilizado, basado en utilizar sus efectos de atenuación y difusión como si se tratara de un segmento de fibra que, por tanto, puede caracterizarse mediante una matriz similar a la de propagación. En este apartado se describe, paso a paso, el método seguido para obtener las funciones de atenuación y difusión que caracterizan el conector en un caso concreto, para ilustrar el procedimiento y, finalmente, los resultados obtenidos para las tres fibras y los dos tipos de conector, utilizando dos métodos diferentes de terminación.

- *Capítulo 3: Modelo matricial del sistema fibra-conector*

En este capítulo se describe, en primer lugar, el método de caracterización de fibras mediante fibras cortas. Las medidas experimentales en las que se basa este método son también barridos de FFPs, pero el proceso de ajuste para obtener los parámetros característicos de la fibra es algo diferente al aplicado en el caso de la caracterización del conector. Una vez determinadas tanto la matriz de propagación de la fibra como la del conector, se realiza primero una validación del modelo comparando resultados experimentales con simulaciones. Para ello, se utilizan, por una parte, medidas de barridos de perfiles radiales en distintas condiciones y, por otra, medidas de anchos de banda en función de la longitud. Para la obtención de los anchos de banda ha sido necesario poner a punto un sistema de medida, utilizando un sistema similar al que se utilizó en un proyecto previo y que se describe también aquí (9). Para terminar, se presenta un ejemplo en el que se utiliza el modelo conjunto fibra-conector para estudiar el impacto de la posición del conector en las propiedades de transmisión de la fibra dentro de un sistema de comunicaciones, valorando sus efectos dependiendo del tipo de fuente.

- *Capítulo 4: Conclusiones*

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

Adicionalmente, se adjuntan unos anexos para facilitar la comprensión del proyecto y completar algunos de sus capítulos.

- *Anexo I: La fibra óptica de plástico y parámetros de interés en comunicaciones*

Se definen algunos parámetros de interés de la POF en comunicaciones y se describen las características de las fibras de salto de índice.

- *Anexo II: Modelo matricial de propagación*

Se explica detalladamente el modelo de propagación por la fibra.

- *Anexo III: Software utilizado*

Se describe el interfaz de LabView™ de usuario del programa, explicando los controles utilizados del mismo y se proporciona una pequeña descripción de los programas de Matlab™ utilizados en este proyecto.

- *Anexo VI: Instrumentos, fibras y conectores*

Se describen las características de los instrumentos usados en la toma de medidas y se muestran las hojas de características de las fibras y de los conectores.

- *Anexo V: Artículo*

Se incluye el artículo presentado en las Conferencias Internacionales de Fibra Óptica de Plástico y Aplicaciones, en Bilbao, en septiembre de 2011.

Capítulo 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS CONECTORES

Dado que los elementos necesarios para la conectorización de fibras ópticas de plástico imponen limitaciones en las propiedades de transmisión de las mismas, es necesario tener una buena caracterización de los distintos tipos de conector no sólo en cuanto a las pérdidas de potencia óptica que introducen en un sistema, sino también la forma en la que se redistribuye la potencia óptica al insertar el conector. Es por tanto necesario un modelo completo del conector que se pueda introducir fácilmente en entornos de simulación, particularmente en el modelo matricial de propagación diseñado en el grupo de investigación de POF.

En este capítulo, se presenta primero un estudio de pérdidas de dos conectores distintos realizado para tres fibras de distintos fabricantes pero con similares características. Se analizan distintas herramientas de terminación para seleccionar las más adecuadas, ya que la calidad de la terminación de las fibras es un factor crítico en la determinación de dichas pérdidas. En concreto, se ha hecho un análisis previo de las cortadoras disponibles para determinar cuál de ellas es la que produce resultados más fiables y repetitivos.

En el siguiente apartado del capítulo se describe un procedimiento para la caracterización de conectores de fibras de plástico que se ha aplicado a dos tipos de conector. Este método se basa en un procedimiento que se ha aplicado ya a la caracterización de otros dispositivos pasivos para POF (6) y que consiste en la obtención experimental de los perfiles de campo lejano de fibras cortas con y sin el dispositivo, de forma que se pueden aislar sus efectos de los de propagación en la fibra.

Como modelo de conector, se propone un modelo matricial, descrito en el anexo II, de forma que se pueda integrar con los programas de simulación de la propagación ya desarrollados, cuyos parámetros libres se estimarán mediante el ajuste de estas medidas experimentales, lo que se describe en el último apartado de este capítulo, junto con un análisis de los resultados obtenidos.

2.1. Análisis de las herramientas de terminación

Uno de los factores más críticos para determinar los efectos del conector es la calidad de la terminación de las fibras implicadas. Por ello, se ha hecho un análisis previo de las herramientas de terminación, en concreto de las cortadoras disponibles, para determinar cuál de ellas es la que produce resultados más fiables y repetitivos. Una vez seleccionada la cortadora, se ha hecho un estudio de las pérdidas de dos tipos de conector, utilizando tres fibras de diferentes fabricantes pero con similares características: Boeing (fibra suministrada por Boeing a nuestros colaboradores de CUNY, diseñada específicamente para aplicaciones de aviónica con resistencia a altas temperaturas), PGU-FB1000 (Toray) y ESKA-PREMIER GH4001 (Mitsubishi). Estas fibras, cuyas hojas de características se muestran en el anexo IV, se nombrarán de ahora en adelante utilizando las siguientes siglas: EAA, PGU y GH, respectivamente. Todas estas fibras son de polimetilmetacrilato (PMMA, más conocido como

Plexiglas®), sus perfiles son de salto de índice (SI-POF), tienen un núcleo de diámetro de 1 mm y una apertura numérica de 0.5. El recubrimiento (o jacket) de las fibras de Toray y Mitsubishi es de polietileno (PE). Más características de las fibras SI-POF se detallan en el anexo I.

Los dos tipos de conector que se van a estudiar en este proyecto son: uno de tipo ST, que está recomendado por Boeing para usar con su fibra y el conector VL, cuyas hojas de características se adjuntan en el anexo IV.

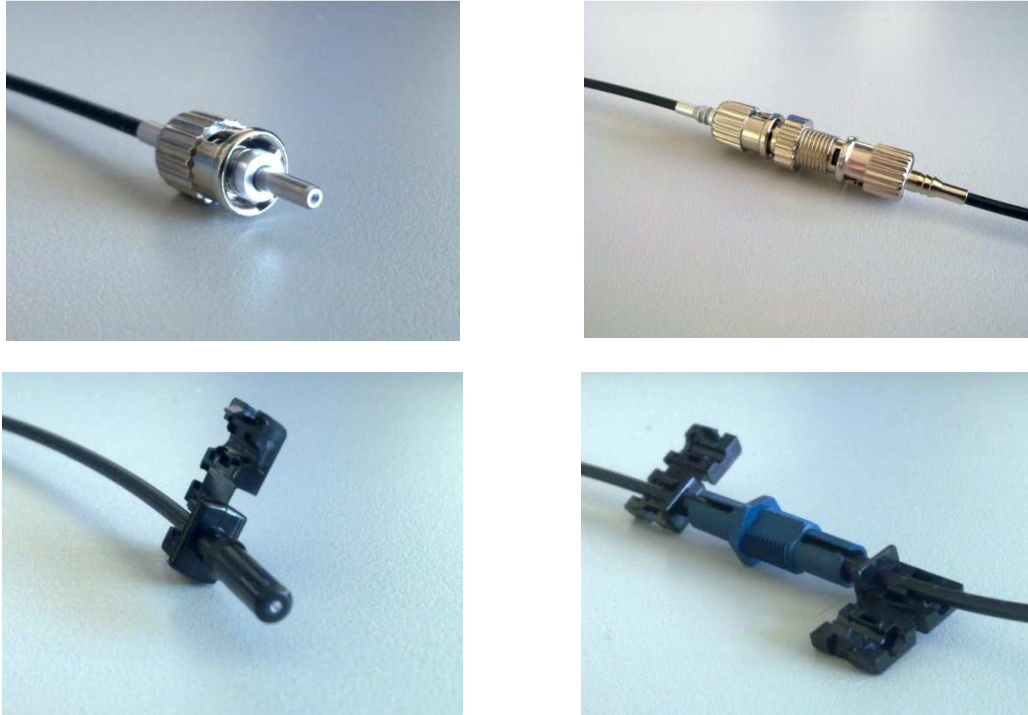


Figura 1: Conectores estudiados, ST y VL

2.1.1 Selección de la herramienta de terminación

Para realizar la conectorización, es necesario utilizar una herramienta que realice un corte tanto de la fibra en sí como del recubrimiento. El corte será mejor cuanto más perpendicular al eje de la fibra se realice, dejando una superficie homogénea y sin rugosidades. Una vez realizado el corte, es necesario quitar el recubrimiento del extremo. La longitud de fibra que hay que pelar depende del tipo de conector en el que hay que insertarla (16 mm en el caso del conector ST y unos 2 mm en el caso del conector VL). Una vez realizado este proceso, es posible mejorar las terminaciones mediante un proceso de pulido con un sistema formado por una serie de lijas de distinto tamaño de grano. Las cortadoras que hemos evaluado aquí, así como el sistema de pulido, han sido adquiridos a través de la compañía FiberOptics.

La herramienta utilizada para quitar el recubrimiento es la Micro-Strip™ *precision stripper* (20), debido a la rapidez del pelado y al hecho de que no se daña la fibra en el procedimiento.

Como se observa en la figura 1, después de pelada, la fibra debe quedar rasa respecto al extremo del conector, sin que sobresalga, ya que es así como se coloca al insertarlo en montajes reales.

Para determinar la herramienta más adecuada para la caracterización de los conectores se ha realizado una evaluación inicial de las cortadoras comerciales de POF disponibles en el

laboratorio. Para ello, se han medido las pérdidas de inserción de un doble conector utilizando tramos cortos de fibra. Además, los cortes se han inspeccionado visualmente para determinar la calidad y repetitividad de los resultados, valorando así mismo, su facilidad de manejo y la duración del proceso completo de preparación.

Las figuras 2, 3 y 4 muestran las tres cortadoras que se han evaluado. La primera cortadora a estudiar es la más costosa de todas (21). Consta de siete aperturas para fibras de distintos tamaños como se observa en la figura 2. La segunda es versátil, barata y fácil de usar, válida para fibras de 0.75 y 1 mm de diámetro de jacket tanto simples como dobles (22). Es un dispositivo usado cuando no se requieren particularmente altos requisitos de calidad. La tercera es una cortadora para POF simple y doble de 1.5 y 2 mm de diámetro de jacket (23). El número de cortes fiables que se pueden realizar con cada cuchilla está limitado, siendo mayor para esta última cortadora y menor para la segunda.



Figura 2: Cortadora 1 (Professional Fiber Cutter)



Figura 3: Cortadora 2 (Disposable Fiber Cutter)



Figura 4: Cortadora 3 (Fiber Cutter)

En una valoración preliminar, se hicieron ocho medidas con cada una de las cortadoras para cada tipo de conector y se obtuvieron la media y la desviación típica. Los resultados obtenidos permitieron descartar la cortadora 1 en el testeo inicial por la gran variabilidad y por la poca calidad observada en los resultados obtenidos, y porque, además, para realizar los cortes es necesario aplicar bastante fuerza y contar con un apoyo firme.

Como se verá en el apartado 2.1.2 donde se presentan los resultados para las cortadoras 2 y 3, aunque la segunda produce menores pérdidas que las otras cortadoras en todos los casos, para las fibras PGU y GH éstas son todavía altas y sus resultados muy variables. Así pues, se decide realizar un pulido de ambas terminaciones antes de insertar el conector para ver si disminuyen las pérdidas y aumenta la repetitividad de las medidas.

El sistema consta de dos lijas: una de grano duro y otra de grano fino (24), un líquido especial para facilitar el lijado (25) y un disco para soportar la fibra durante el lijado, de forma que la punta de la fibra y la lija estén colocadas perpendicularmente (26)(27). El procedimiento consiste en cortar y pelar el extremo de la fibra e insertar el conector que proceda. En este punto, el conector ya estaría listo para su uso en el proceso sin pulido. Para comenzar el

pulido, se colocan las lijas sobre una superficie plana donde se pueda trabajar fácilmente, se vierte una gota de líquido primero sobre la lija de grano duro (2000-grit *polishing paper*) y se hacen veinte movimientos con la fibra formando un ángulo de 90° con el papel de lija como se muestra en la figura 5.

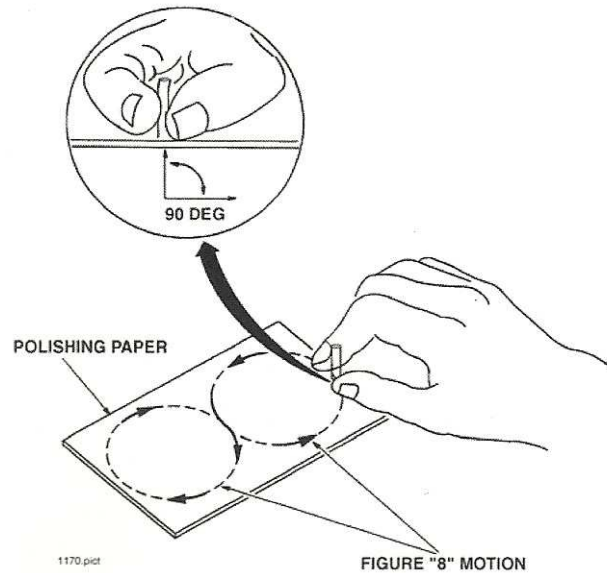


Figura 5: Ejemplo del movimiento del proceso de pulido

Haciendo este movimiento en forma de “ocho” se intenta que la fibra se lime igual en todas las direcciones y quede una punta plana y homogénea. A continuación se vuelve a pasar la fibra con el conector colocado y el disco por la lija de grano fino (3 μm *polishing paper*) con una gota de líquido vertido en ella. Se hacen otros veinte movimientos y tras retirar el disco que soporta la fibra ya tenemos el conjunto fibra-conector, de la misma manera que se tendrá en la realidad. Este proceso se realiza para cada uno de los extremos que se van a conectar, por lo que el proceso de conectorización completo tiene una duración de 4 minutos, considerablemente más largo que sin el pulido.

En el apartado siguiente se presenta el estudio de pérdidas de inserción sólo con las cortadoras 2 y 3. Y en el caso de la cortadora 3, que es con la que se han obtenido menores pérdidas en general, se ha analizado el efecto del proceso de pulido. Finalmente, para la preparación de las fibras en los experimentos de caracterización se ha elegido la cortadora 3 tanto por sus menores pérdidas, como se verá en el apartado 2.1.2, como por su facilidad y rapidez de manejo.

2.1.2 Análisis de las pérdidas de inserción de los conectores ST y VL

Para determinar las pérdidas de inserción de los conectores, se aplica el siguiente procedimiento. Se utiliza como referencia un tramo de fibra de pequeña longitud con la que se mide la potencia óptica: P_0 . Esta fibra se corta en dos segmentos que se preparan con la herramienta correspondiente para insertar un conector simple. Los dos segmentos simples se unen con un conector hembra-hembra como se muestra en la parte derecha de la figura 1, en unos casos puliendo y en otros sin pulir, y se mide de nuevo la potencia óptica: P_c . Las pérdidas de inserción del conector en dB, se calculan como:

$$\text{Pérdidas} = 10 \times \log_{10}\left(\frac{P_c}{P_0}\right) \quad [2.1]$$

Las medidas de potencia se han realizado con el equipo medidor de potencia, FOTEC, que consta de fuente de visible y detector adaptados para fibras de plástico.

Para obtener un mayor rendimiento de cada tramo de fibra, se ha procedido a insertar primero un conector VL y después uno ST, con la misma medida de referencia.

A continuación se muestran dos figuras. La número 6 con un diagrama de barras con las pérdidas medias introducidas por cada uno de los conectores en las fibras de EAA, PGU y GH para las dos cortadoras, y la número 7 donde se representan de nuevo las pérdidas de la cortadora 3 sin pulido, junto con las obtenidas tras el proceso de pulido para poder realizar una comparación. En la tabla 1 se muestra la desviación típica de las pérdidas para todas las condiciones.

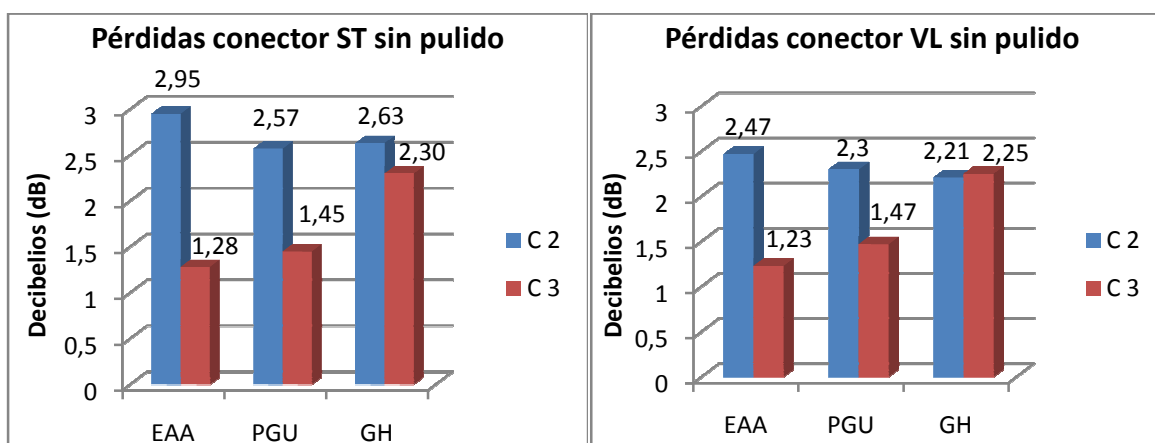


Figura 6: Pérdidas medias de los conectores ST y VL en las distintas fibras con las cortadoras 2 y 3 sin la mejora del pulido

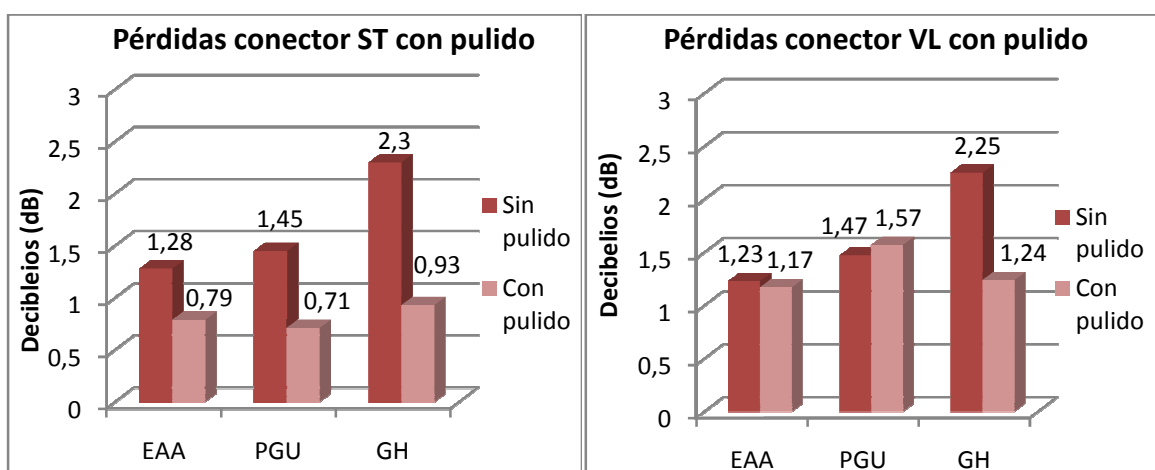


Figura 7: Comparación de las pérdidas medias con y sin pulido de los conectores ST y VL con la cortadora 3 en las distintas fibras

Desviación típica	Conector ST			Conector VL		
	C3 Sin pulido	C3 Con pulido	C2	C3 Sin pulido	C3 Con pulido	C2
EAA	0.19	0.28	0.46	0.17	0.40	0.69
PGU	0.17	0.16	0.38	0.20	0.51	0.38
GH	0.31	0.30	0.59	0.37	0.31	0.70

Tabla 1: Desviación típica de las pérdidas para cada una de las tres fibras en las dos condiciones estudiadas

En la figura 6, donde se comparan los resultados con las dos cortadoras puede verse que, con cualquiera de ellas, las pérdidas para ambos conectores con una fibra dada son similares. La cortadora 3 produce menores pérdidas para todas las fibras pero mayores diferencias entre fibras: menores para EAA, un poco mayores para PGU y mucho mayores para la fibra GH. Con la cortadora 2 todas las fibras exhiben mayores pérdidas, mayores que 2 dB en todos los casos, pero son prácticamente iguales para todas las fibras ya que, con esta cortadora, la desviación típica es bastante mayor.

En la figura 7, se comparan los resultados obtenidos con la cortadora 3 seguida o no del proceso de pulido. La figura muestra cómo este proceso disminuye de una manera considerable las pérdidas para las tres fibras con el conector ST, que son ahora menores que 1 dB para todas. Esta disminución es particularmente notable para la fibra GH, cuyas pérdidas para este tipo de conector pasan de 2.3 dB a 0.87 dB de forma que, tras el proceso de pulido, son prácticamente iguales a las de las otras fibras. Las pérdidas de la fibra GH con conector VL también disminuyen, siendo tras el pulido la mitad que antes. Sin embargo, para las fibras EAA y PGU las pérdidas obtenidas con este conector siguen siendo del mismo orden que las obtenidas sin pulido.

Comparando los resultados para ambos conectores con la cortadora 3, incluyendo el proceso de pulido, se ve que las pérdidas para el VL (con un promedio entre fibras de 1.33 dB) son mayores que para el ST (0.81 dB) y que su variabilidad es también mayor. De hecho, los resultados obtenidos, en general, son peores con este conector. Una posible explicación de estas diferencias entre ambos conectores, que no se observan en las medidas sin pulido, puede ser que el líquido de pulido residual afecta más a la fibra en el caso del conector VL que tiene una mayor holgura que el ST.

En resumen, vemos que realizando la terminación de los extremos de la fibra con la cortadora 3 seguida por el proceso de pulido obtenemos menores pérdidas. El proceso de pulido, que es relativamente largo y que introduce mayor variabilidad, es necesario para obtener pérdidas con la fibra de tipo GH comparables a las de las otras dos fibras analizadas. Así pues, aunque la disminución de las pérdidas para las fibras EAA y PGU no es tan elevada como en el caso de la GH, la diferencia puede ser muy relevante en diseños con un gran número de conectores, como es el caso de una red de distribución multimedia en un avión.

Por otra parte, de estos resultados se puede extraer la conclusión de que las pérdidas de conectorización dependen más del tipo de fibra que del tipo de conector utilizado, y que es necesario realizar un análisis de las herramientas de terminación para determinar las más adecuadas a cada tipo de fibra.

2.2 Protocolo experimental

El procedimiento de caracterización del conector se basa en la obtención experimental de los perfiles de campo lejano de fibras cortas, haciendo un barrido del ángulo de entrada para tener información más precisa sobre la variación angular. Estos barridos se realizan primero sin el conector y luego insertándolo cerca del extremo de salida de la fibra, de forma que se pueden aislar sus efectos de los de propagación de la misma. El capítulo se organiza de la forma siguiente: en primer lugar, se describe el sistema experimental utilizado para tomar las medidas de FFP y la extracción de los perfiles radiales, así como el protocolo seguido en las medidas de caracterización y selección de los resultados experimentales que se utilizarán en el siguiente apartado para la determinación de los modelos de conector. A continuación, se muestran los resultados experimentales, el modelo de conector obtenido y, finalmente, las matrices de dichos conectores.

2.2.1 Sistema experimental para la obtención de los FFPs

El montaje experimental para la obtención de los FFPs en función del ángulo de inyección se muestra en la figura 8 (10). Se pueden distinguir dos bloques: el *sistema de inyección* a la izquierda del esquema y el *registro de imagen* que corresponde a la parte localizada dentro de una caja sellada para evitar que entre la luz exterior.

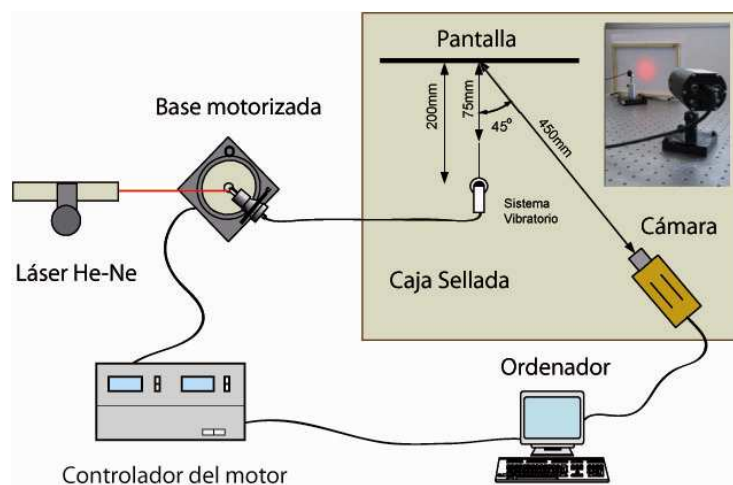


Figura 8: Sistema experimental

- El *sistema de inyección* está compuesto por la fuente de luz colimada (en nuestro caso, un láser He-Ne que emite luz a 635nm) que se inyecta directamente en el extremo de entrada de la fibra, colocada en un rotor que permite variar el ángulo de inyección.
- La *parte de registro* permite captar, procesar y almacenar en el ordenador las imágenes del FFP. Consta de una pantalla blanca sobre la que se proyecta la luz proveniente del extremo de salida de la fibra, una cámara monocromática de 12 bit (QICAM FAST 1394) y un sistema anti- speckle colocado a 30 cm del extremo de salida de la fibra que disminuye el ruido en el registro. La cámara está situada formando un

ángulo de 45° respecto a la pantalla para registrar la imagen del FFP reflejada en ésta sin que se interponga la propia fibra.

En un barrido completo, el ángulo de inyección varía desde -40° hasta 40° en pasos de 1° . Todo el proceso está controlado por un programa del entorno Labview™ desarrollado previamente por el Grupo de Tecnologías Fotónicas. Éste dirige el movimiento del motor durante todo el barrido, registra la imagen de la pantalla en cada posición que toma el motor y realiza las correcciones necesarias antes de extraer el perfil radial y almacenar los datos.

Los perfiles radiales para cada ángulo de inyección de la fibra son simetrizados y ordenados por columnas en una única matriz que puede ser representada como una imagen para ver de forma simultánea todas las medidas de un mismo barrido.

En la figura 9 se muestra un ejemplo de representación en forma de imagen de la matriz del conjunto de perfiles radiales simetrizados. Cada columna representa el perfil radial para un ángulo de entrada (eje horizontal) dado en función de los ángulos de salida (eje vertical). Los perfiles para ángulos de inyección negativos también se han medido y puede observarse que en algunas medidas no son iguales a los obtenidos para ángulos positivos, revelando la desviación de la respuesta simétrica ideal. La paleta de colores de representación va desde el azul al rojo intenso, de forma que los colores más cálidos corresponden a mayor potencia y los fríos a una potencia menor.

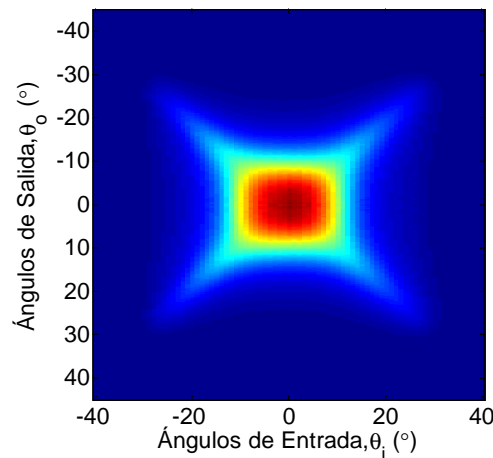


Figura 9: Ejemplo de conjunto de perfiles radiales

El protocolo de obtención de barridos de perfiles radiales seguido para la caracterización del conector es similar al de caracterización de las pérdidas de inserción descrito en el apartado anterior. Se realiza primero una medida sin conector, tras ajustar correctamente el alineamiento de la fibra, ya que la correcta inyección de luz para todos los ángulos depende de esta alineación.

Una vez realizado este barrido, se corta la fibra a una distancia de 20 cm de la pantalla, se preparan ambos extremos y se conectorizan, siguiendo el proceso descrito en los apartados anteriores. Hay que tener especial cuidado de que en el proceso de preparación de las terminaciones y conectorización no se modifiquen las condiciones iniciales de inyección de la fibra, con las que se registró el barrido de referencia.

2.2.2 Resultados experimentales

La figura 10 muestra las matrices de perfiles radiales para cada una de las tres fibras estudiadas, obtenidas con la cortadora 3 sin aplicar el proceso de pulido. Cada imagen muestra todos los perfiles radiales obtenidos en una determinada condición de la forma descrita en la figura 9. Las imágenes de la izquierda muestran la medida del conjunto de perfiles radiales para un tramo corto de fibra sin conectores. Las centrales muestran la medida realizada con el conector ST insertado cerca del extremo de salida de la fibra. Por último, las imágenes de la derecha muestran las medidas con el conector VL. Todas las imágenes de una misma fibra se han normalizado al máximo de la potencia de la matriz medida sin conector. Además las imágenes se representan con una transformación de logaritmo, para poder apreciar mejor así los valores de potencia más bajos que se dan en los ángulos altos. A partir de este punto, todas las imágenes mostradas en este proyecto estarán representadas de esta misma forma.

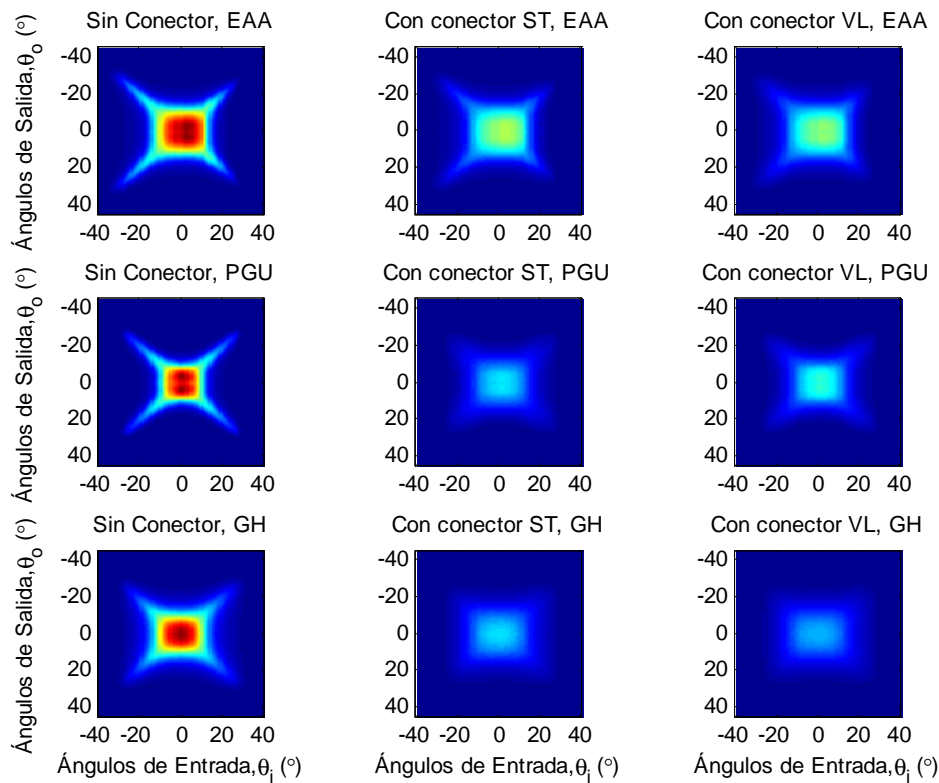


Figura 10: Muestra de una medida sin y con conector para las fibras estudiadas

Las imágenes del conjunto de perfiles radiales obtenidos con conector muestran un ensanchamiento debido a los efectos de la difusión y una pérdida de potencia. Las “patas” estrechas, visibles en las imágenes de la izquierda, obtenidas sin conector casi desaparecen en las demás imágenes debido a los efectos del conector. Además, estas figuras revelan diferencias entre las fibras. No sólo el patrón sin conector es diferente para cada una, sino que los efectos del conector no son iguales para las tres. Por ejemplo, difusión y atenuación parecen ser mayores para la fibra GH que para las otras dos. Estas diferencias han sido comprobadas con más medidas, lo que lleva a la búsqueda inicial de un modelo diferente no sólo para cada conector, sino también para cada fibra.

En la figura 11 se muestra un ejemplo de los barridos de perfiles radiales obtenidos aplicando el proceso de pulido. En este ejemplo, puede verse que el nivel de las imágenes es mayor que en las correspondientes de la figura 9, revelando una menor atenuación consecuente con las menores pérdidas de inserción medidas en el apartado 2.1.2. También puede observarse que las “patas” tienen una mayor nitidez, lo que permite adelantar que la difusión será también menor que cuando no se realiza el pulido. En el caso de la fibra GH las diferencias son mucho más notables que para los otros dos tipos de fibra.

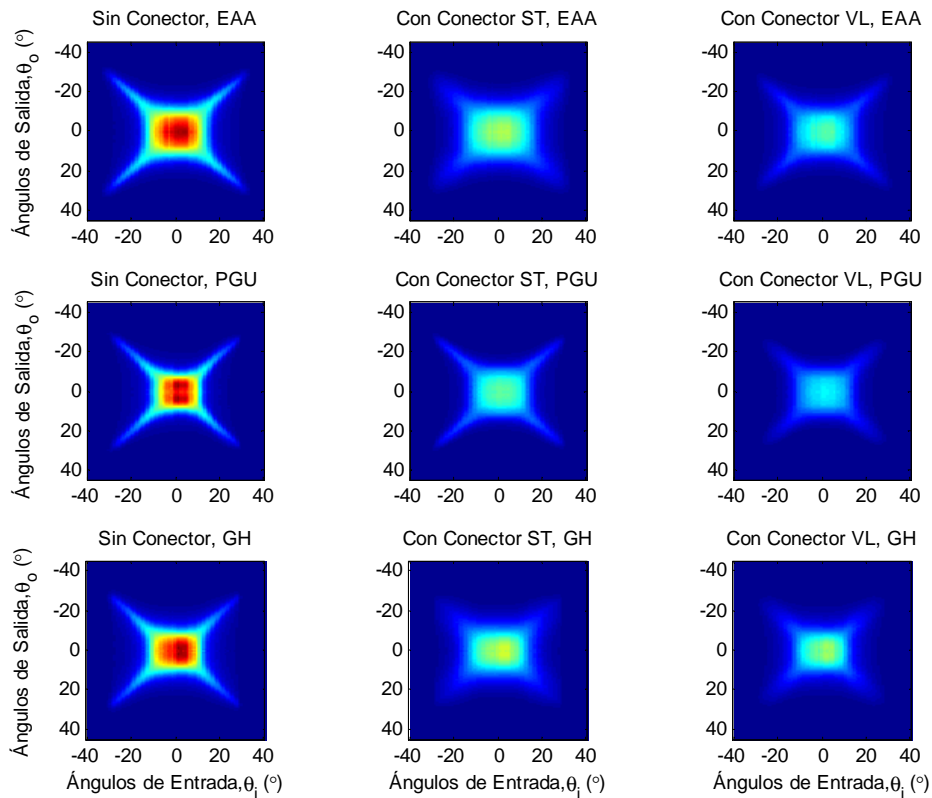


Figura 11: Muestra de una medida sin y con conector para las fibras estudiadas con el proceso de pulido

Para realizar la caracterización en cada condición, definida por el tipo de fibra, el tipo de conector y el método de terminación (con o sin pulido), se han obtenido al menos tres parejas de medidas.

2.3 Modelo del Conector

Como modelo de conector, se propone un modelo matricial de forma que se pueda integrar de forma sencilla en los programas de simulación de propagación ya desarrollados. En principio, la conectorización puede verse simplemente como una redistribución de la potencia que sale de una fibra y se inyecta en otra que se encuentra a una determinada distancia, en general del orden del milímetro. Esta distancia entre fibras causa pérdidas debido al bloqueo de ciertos ángulos (11). Además, la fuerte difusión que se produce en la inyección (12) produce una redistribución de la potencia en ángulos que depende de la matriz de inyección característica de cada tipo de fibra, así como de la calidad del corte. Por tanto, incluso para el mismo tipo de

conector y de fibra, el efecto de la conectorización puede presentar una cierta variabilidad, dependiendo de las herramientas de terminación. Por ello, en un principio caracterizaremos de forma independiente el efecto de cada tipo de conector sobre cada tipo de fibra. Inicialmente, esta caracterización se realiza a partir de medidas obtenidas utilizando la cortadora 3, sin mejorar las terminaciones mediante el proceso de pulido debido a que para la fibra EAA que se estudió en primer lugar, los resultados obtenidos fueron buenos y repetitivos. Como esto no es así en el caso de las otras dos fibras se repite el proceso de caracterización con datos experimentales obtenidos, mejorando la terminación de la fibra mediante el pulido descrito en el apartado 2.1.

Los efectos de conectorización se pueden modelar como un sistema lineal, ya que la potencia que se propaga en un determinado ángulo en la primera fibra pasa a propagarse en ese ángulo, u otros ángulos diferentes, al entrar en la segunda fibra. De esta forma, la potencia que se propaga en la segunda fibra con determinado ángulo puede ponerse como combinación lineal de la potencia que se propagaba en otros ángulos por la primera fibra. Sin embargo, el efecto no es espacialmente invariante, ya que la redistribución de potencia entre los ángulos depende del ángulo de incidencia. El conector actúa como un sistema lineal angularmente variante que podemos modelar mediante una matriz característica como se hizo anteriormente en el caso de un scrambler (6).

En las imágenes de los perfiles radiales, se observa que los efectos que el conector produce sobre la distribución de potencia óptica, atenuación y difusión, son similares a los que se producen en la propagación de potencia en varios metros de fibra, aunque los de este dispositivo se realizan de forma localizada en lugar de distribuida en la longitud, como ocurre para la fibra. Por ello, el modelo de conector que hemos elegido se basa en describir sus efectos como si se tratase de un segmento de fibra de una cierta longitud, que puede caracterizarse por sus funciones de atenuación y difusión angulares. Este modelo tiene la ventaja de que permite analizar separadamente los efectos difusivos y de atenuación introducida por el conector. Los parámetros libres del modelo se estiman mediante el ajuste de las medidas de perfiles radiales de la fibra, con y sin conector, mostradas en el apartado anterior, utilizando el entorno de programación Matlab™ como se describe con detalle en la siguiente sección.

2.3.1 Modelo de atenuación-difusión

Como hemos dicho, la difusión de la potencia y las pérdidas introducidas por el conector son similares a las que se producen tras varios metros de propagación de fibra. De esta forma, se parte de una matriz tridiagonal similar a la que se utiliza para caracterizar a la fibra dentro del modelo matricial de propagación definido en el anexo II. Por tanto, el conector estará caracterizado por sus funciones de atenuación y difusión angulares, igual que un tipo determinado de fibra. Sin embargo, como los efectos del conector son mucho más intensos y localizados, para tener efectos equivalentes sobre la potencia óptica, será necesaria la propagación de ésta a través de bastantes metros de fibra. Así pues, la matriz tridiagonal, $M_{cc,0}$, debe elevarse a una determinada potencia según los metros de fibra que elijamos para modelar los efectos del conector, ecuación [2.3]. El resultado será la matriz característica del

conector, \mathbf{M}_{cc} , que tendrá un mayor número de diagonales distintas de cero que la original tridiagonal, simulando el efecto equivalente de una longitud larga de fibra.

$$\mathbf{M}_{cc,0} = \mathbf{A} + \mathbf{D} \quad [2.2]$$

$$\mathbf{M}_{cc} = (\mathbf{M}_{cc,0})^{L/dz} \quad [2.3]$$

Una vez elegido este modelo de conector, se procede a describir la obtención de los parámetros y el cálculo de la matriz característica, aplicándolo primero a las medidas obtenidas con la fibra EAA y el conector ST. Después, el mismo formalismo se aplica a la fibra EAA con el conector VL y a las otras dos fibras, la PGU de Toray y la GH Eska Premier de Mitsubishi con ambos conectores. De esta forma, se pretende verificar si la acción de los conectores es única para cualquier tipo de conector y si el modelo de conector es global para todas las fibras o actúa sobre cada una de forma distinta.

2.3.2 Procedimiento de caracterización

Como se ha dicho, para obtener la matriz característica del conector hay que determinar previamente sus funciones de difusión y atenuación angulares. Para ello, se ha diseñado un proceso de ajuste de parámetros que determinan estas funciones utilizando barridos de perfiles radiales experimentales. En todos los casos, se ha realizado en primer lugar un ajuste independiente de cada una de las medidas. Una vez hecho esto y verificado que el promedio de la matriz característica para cada fibra es una buena representación del conector para todas las medidas, se ha utilizado ese promedio como matriz característica para un conector y tipo de fibra dado. Para describir el proceso completo, hemos elegido el conector ST y la fibra EAA con terminaciones sin pulir. Una vez explicado éste con detalle para dicha condición, se presentarán los resultados obtenidos para el resto de las condiciones.

En la figura 12 se presentan las cuatro medidas obtenidas insertando el conector ST en la fibra EAA.

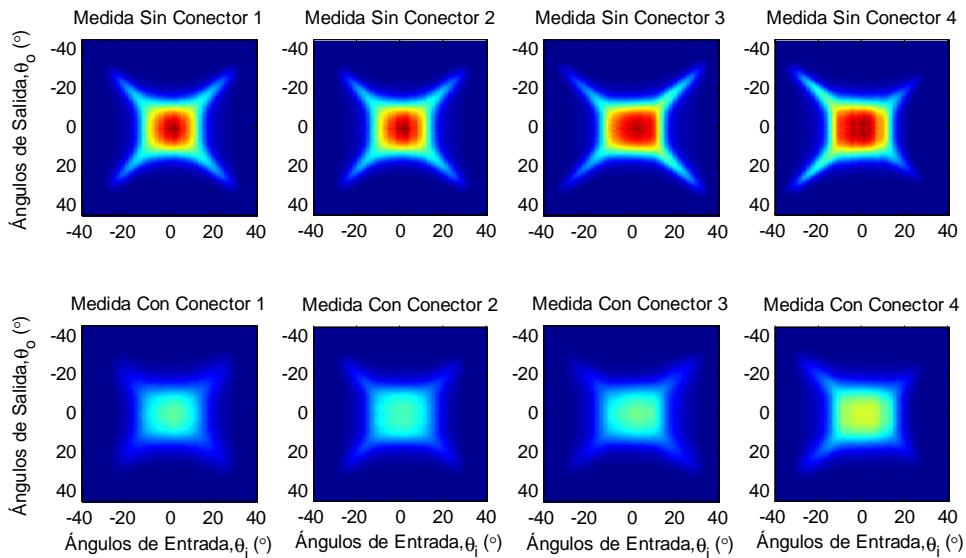


Figura 12: Medidas sin y con conector de la fibra EAA con el conector ST

Se observa que las medidas sin conector que reflejan las propiedades de inyección en esta fibra, son muy similares. En las matrices con conector se ve que, en este caso, los efectos del conector comentados al comienzo del capítulo como son ensanchamiento debido a la difusión y pérdida de luz debido a la atenuación, actúan de forma semejante en todos los casos. La diferencia entre las cuatro imágenes sin conector revela la dependencia de la terminación de la fibra en el extremo de inyección, así como las ligeras imprecisiones en el alineamiento del sistema. El modelo de conector es independiente de estas condiciones puesto que son las mismas para la medida con y sin conector, y la inserción del mismo se realiza con precaución para no modificar la posición de la fibra.

2.3.2.1 Cálculo de la atenuación

Para la obtención de la atenuación se usa la matriz de perfiles radiales. La mitad superior de la imagen es una réplica de la parte inferior, que es la que contiene realmente la información de la medida. Esta parte, a su vez, se divide en dos cuadrantes, uno para los ángulos positivos y otro para los negativos.

Teniendo en cuenta las expresiones que describen el cálculo de los elementos de la matriz básica en el anexo II para $\omega=0$, puede verse que la suma de todos los elementos de una columna de la matriz está relacionada con la potencia total del ángulo correspondiente.

Los elementos de la matriz de propagación para frecuencia $\omega=0$ vienen dados por las siguientes expresiones:

$$M_{k,k-1} = \left(d(k \cdot \Delta\theta) - \frac{1}{2} \frac{d(k \cdot \Delta\theta)}{k} - \frac{1}{2} d'(k \cdot \Delta\theta) \Delta\theta \right) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \quad [2.4]$$

$$M_{k,k} = \exp(-\Delta z \cdot \alpha(k \cdot \Delta\theta)) - 2d(k \cdot \Delta\theta) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \quad [2.5]$$

$$M_{k,k+1} = \left(d(k \cdot \Delta\theta) + \frac{1}{2} \frac{d(k \cdot \Delta\theta)}{k} + \frac{1}{2} d'(k \cdot \Delta\theta) \Delta\theta \right) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \quad [2.6]$$

Si sumamos los elementos de una columna puede comprobarse que los términos dependientes de la difusión o sus derivadas se cancelan dando un término exponencial que depende de la atenuación angular:

$$M_{k,k-1} + M_{k,k} + M_{k,k+1} = \exp(-\Delta z \cdot \alpha(k \cdot \Delta\theta)) \quad [2.7]$$

Así, el cociente del valor de una columna de la matriz sin conector entre el valor de esa misma columna de la matriz con conector, ofrece directamente una estimación de la pérdida de potencia para el ángulo correspondiente a cada columna, obteniendo la función de atenuación directamente a partir de cada par de medidas con y sin conector.

En la figura 13 se muestra la atenuación estimada para cada par de medidas de la fibra EAA con el conector ST insertado, así como la atenuación promedio. Se puede observar que está es mayor para el cero y para ángulos bajos, lo cual se puede explicar teniendo en cuenta que refleja la fuerte difusión producida por el conector que es más intensa para estos ángulos. Para los ángulos altos la atenuación obtenida es muy ruidosa ya que depende del cociente de valores muy pequeños. Por ello, se aproxima a su valor asintótico lo cual no supone mucho error porque en estos ángulos se propaga poca potencia.

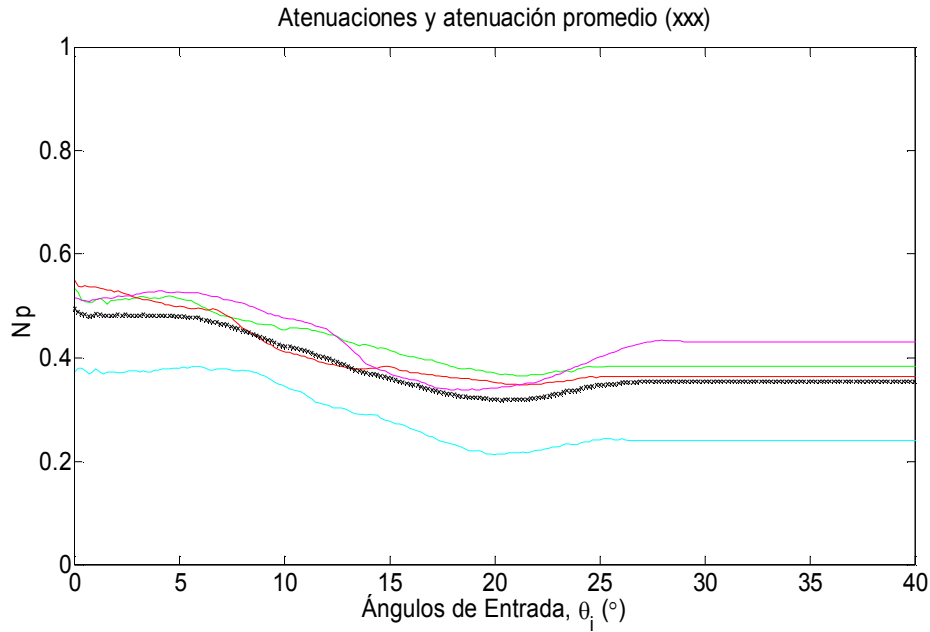


Figura 13: Atenuaciones y atenuación promedio de la fibra EAA con el conector ST

2.3.2.2 Estimación de la difusión

Una vez obtenida la atenuación, la difusión se obtiene para minimizar la siguiente función de coste:

$$f_{coste} = norm(P_{cc}^{exp} - P_{cc}^{sim}) \quad [2.8]$$

Siendo

$$P_{cc}^{sim} = M_{cc} \cdot P_{sc}^{exp} \quad [2.9]$$

Donde P_{cc}^{exp} es la matriz formada por los perfiles radiales medidos con conector y P_{cc}^{sim} es el producto matricial de la matriz característica del conector en cuestión por la matriz de perfiles radiales medidos sin conector. La matriz de propagación es la equivalente a una longitud de L de 10 metros de fibra. La función $d(\theta)$ se modeló inicialmente como una bisigmoide igual que en el caso de la fibra pero los resultados han demostrado que el mínimo error se obtiene para una difusión constante. Los valores de la difusión obtenidos para las cuatro medidas se muestran en la tabla 2:

	1	2	3	4
Difusión	0.00034	0.00034	0.00033	0.00024
Error	3.3900	3.6499	3.4260	6.9569
Error promedio	3.3380	3.6484	3.4488	9.2274

Tabla 2: Difusión y errores obtenidos con la fibra EAA y el conector ST

En la tabla se muestran también el error dado por la función de coste definida en la ecuación [2.8], dividido entre el máximo valor de potencia de la matriz correspondiente a cada medida con conector para poder comparar las magnitudes de los errores de las diferentes medidas independientemente de su amplitud. La figura 14 muestra una comparación de las matrices de perfiles radiales experimentales (fila superior) y las simuladas. En la fila intermedia se muestran las imágenes de las matrices de perfiles radiales calculadas, introduciendo en la ecuación [2.9] la matriz de perfiles sin conector para cada caso junto con la matriz característica obtenida específicamente para cada medida.

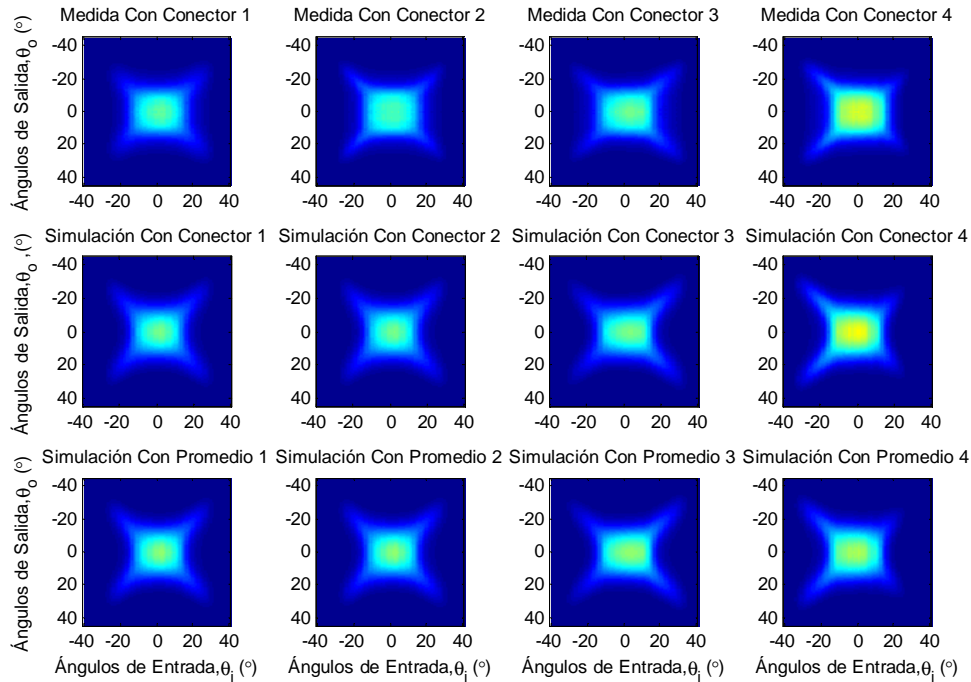


Figura 14: Comparación de las medidas con conector, de las simulaciones de la matriz de conector propia de cada medida y de las simulaciones hechas con la matriz promedio

Debido a la semejanza de las funciones de difusión y atenuación características, obtenidas para todas las medidas, se ha obtenido una matriz calculada con la atenuación y difusión promedio de las cuatro medidas. En la tabla 2, la última fila muestra el error de modelar el conector con esta matriz en cada una de las medidas. Se ve que cuando se usa la matriz promedio en lugar de la propia de cada medida aumenta el error en unas décimas, pero sigue siendo del mismo orden que con la matriz obtenida específicamente para dicha medida. Esto se puede verificar visualmente comparando las simulaciones obtenidas con la matriz promedio que se muestran en la última fila con las medidas realizadas con conector de la figura 12.

Estos resultados demuestran que la matriz promedio proporciona un modelo adecuado para la condición analizada. El mismo proceso se ha seguido para las fibras PGU y GH con el conector ST y también con el conector VL para los tres tipos de fibra y con las terminaciones con y sin pulido. En todos los casos, la matriz promedio es una representación razonable del conector por lo que en el siguiente apartado se presenta únicamente los resultados promedio.

2.4 Matrices de los conectores

En este apartado se presentan las atenuaciones medias de cada fibra para cada conector, las tablas de difusiones medias y desviaciones típicas, así como las seis matrices promedio calculadas a partir de ellas. Así mismo, se comparan los resultados obtenidos con las distintas fibras y los dos tipos de conector y se obtienen conclusiones preliminares.

En las figuras 15 y 16 se observa que las funciones de atenuación tienen algunas características comunes. En general, la atenuación es mayor en torno al origen porque los efectos de la difusión son mayores para estos ángulos. Después, la atenuación disminuye y para ángulos a

partir de unos 15°-25°, aumenta de nuevo. Debido a que el cálculo de la atenuación se realiza a partir de un cociente de datos experimentales de potencia y que los ángulos altos transportan poca potencia, en esta zona el cociente es bastante variable y da lugar a unos valores de atenuación más ruidosos, aunque por el mismo motivo su influencia en los cálculos también es menor. Aparte de estas semejanzas, cada tipo de fibra presenta características que la diferencian de las demás y que son similares en ambos tipos de conector cuando no se aplica el proceso de pulido. Con el proceso de pulido se introduce una mayor variabilidad y aparecen más diferencias dentro del mismo tipo de fibra con distinto conector.

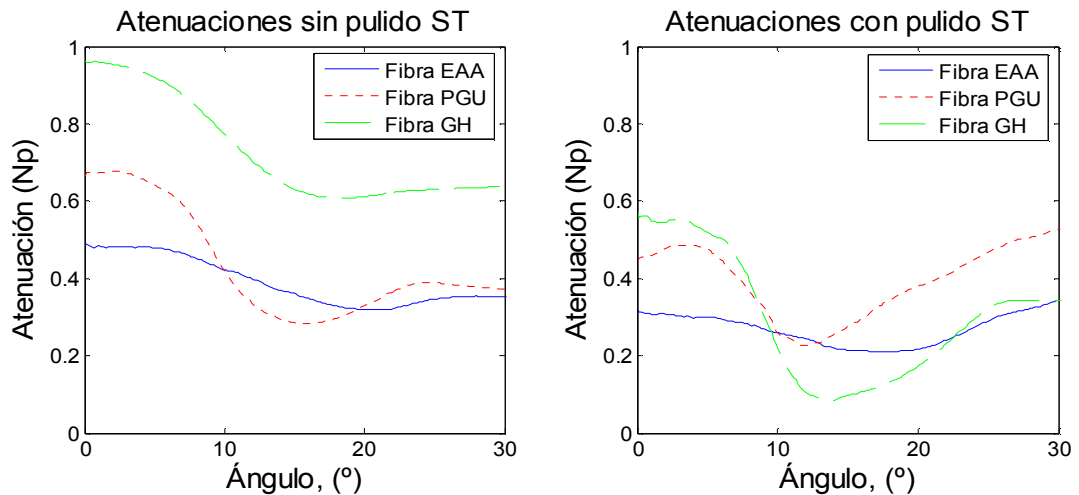


Figura 15: Atenuaciones promedio de las tres fibras con el conector ST con y sin pulir

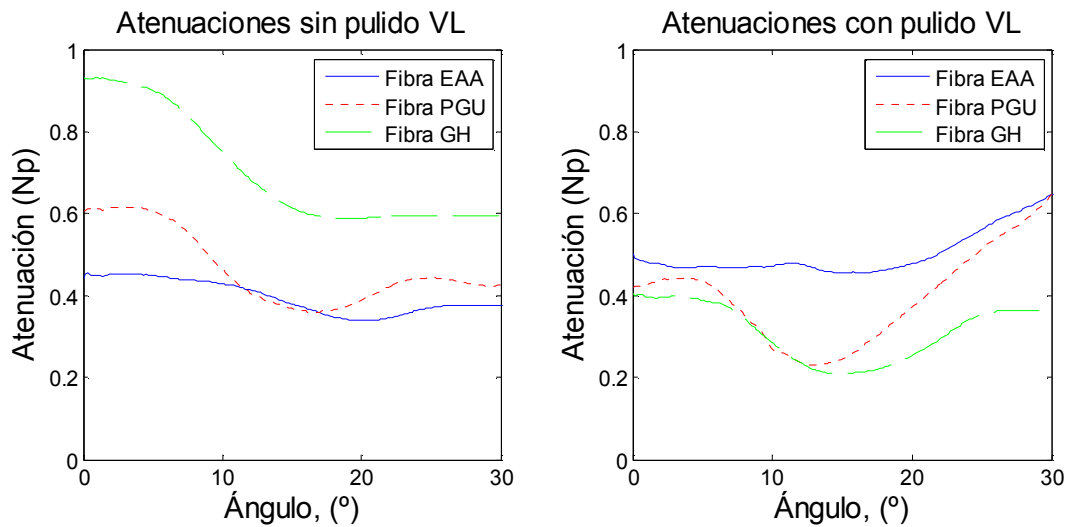


Figura 16: Atenuaciones promedio de las tres fibras con el conector VL con y sin pulir

Si nos centramos primero en las atenuaciones obtenidas sin aplicar el proceso de pulido, vemos que, aparte de pequeñas variaciones en la forma de la función, la principal diferencia entre los tres tipos de fibra es de nivel: la fibra GH tiene mucha más atenuación que las demás y la EAA es algo menor que la PGU. Posiblemente, la forma de la función está condicionada por la matriz de inyección característica de cada fibra descrita en el anexo II y que describe cómo se distribuye la potencia óptica al ser inyectada en la fibra. En la inyección la potencia se difunde fuertemente y de forma característica para cada tipo de fibra. Otro factor importante

puede ser la flexibilidad del material del jacket. Por ejemplo, la fibra EAA, cuyo recubrimiento es más rígido, presenta la función de atenuación más plana que para las otras fibras. La diferencia de nivel de la función entre conectores puede estar causada por la distancia entre las puntas de las fibras al hacer la conectorización pero el material del jacket también es importante ya que condiciona la calidad del corte como vimos en el apartado 2.1.

Al aplicar el proceso de pulido, el nivel de la función de atenuación disminuye en todos los casos (excepto para la EAA con conector VL) lo que es consecuente con las menores pérdidas encontradas. Para la fibra GH, esta disminución es bastante drástica ya que se pone en un nivel similar al de las otras fibras. Sin embargo, el incremento para ángulos altos es más abrupto que en el caso anterior, alcanzando valores similares o incluso más altos para 30° . La explicación es que, por la manera en la que se realiza el proceso de pulido, éste es más adecuado para la parte central de la fibra, mientras que puede ser menos eficiente en los bordes de la misma, dependiendo de la presión que aplica la persona que realiza dicho pulido. Esta mayor intervención humana en el proceso conduce una mayor variabilidad en los resultados, de forma que las funciones de atenuación obtenidas para las fibras pulidas son más ruidosas que en el caso sin pulido. En particular, la función obtenida para la fibra EAA con conector VL posiblemente discrepa de lo que sería consecuente y pensamos que con alguna medida más, se hubiera obtenido algo más similar a la obtenida para esta fibra con el ST.

La figura 17 muestra las difusiones medias (multiplicadas por 10^4 para poder compararlas mejor) para todas las condiciones estimadas de la forma descrita en el apartado anterior. Se observa cómo la difusión disminuye en todos los casos con el proceso de pulido. En el caso de las fibras EAA y PGU esta disminución es algo menor que para la GH, lo mismo que ocurría en el caso de la atenuación. Aun así, la fibra con mayor difusión es siempre la GH, aunque con el proceso de pulido, se hace más comparable a la de las otras fibras.

En las tablas 3 y 4 se presentan las desviaciones típicas y el promedio del error para todas las medidas de cada fibra para ambos tipos de conector. Los errores promedio se han obtenido a partir de los calculados normalizando al máximo de la imagen con conector como se describió en el apartado 2.3.2.2.

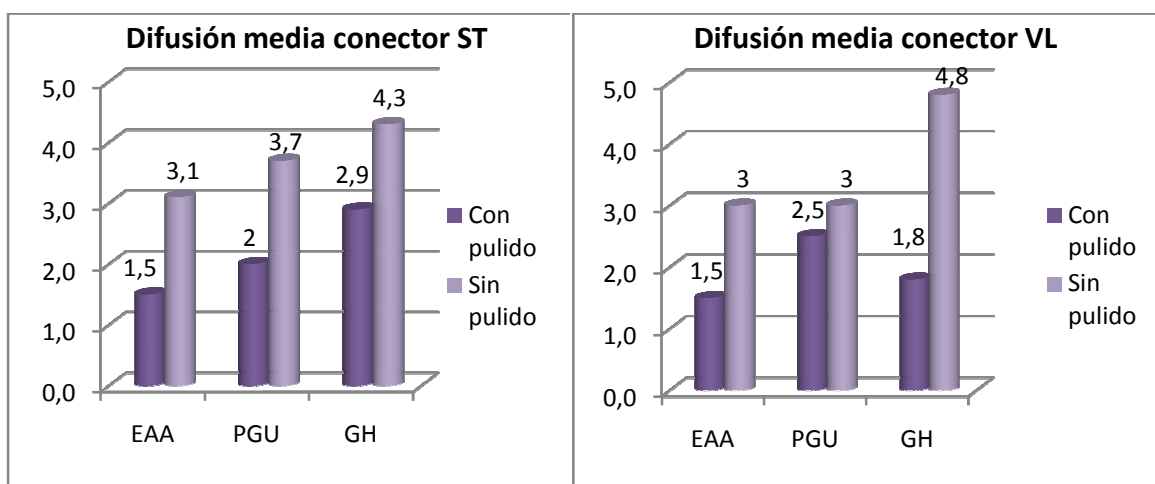


Figura 17: Comparación de las difusiones medias de las tres fibras con y sin el efecto del pulido

CONECTOR ST	Desviación típica		Promedio del error	
	Sin pulido	Con pulido	Sin pulido	Con pulido
Fibra EAA	0.000042	0.000100	4.4210	2.934
Fibra PGU	0.000080	0.000070	4.5009	4.582
Fibra GH	0.000059	0.000053	7.1002	6.7314

Tabla 3: Difusiones medias, desviaciones típicas y promedio de error de las tres fibras con conector ST

CONECTOR VL	Desviación típica		Promedio del error	
	Sin pulido	Con pulido	Sin pulido	Con pulido
Fibra EAA	0.000062	0.000069	3.6731	5.6163
Fibra PGU	0.000061	0.000009	3.5271	5.5810
Fibra GH	0.000145	0.000067	7.5775	3.5056

Tabla 4: Difusiones medias, desviaciones típicas y promedio de error de las tres fibras con conector VL

Finalmente, en las figuras 18 y 19 se muestran las matrices promedio de las tres fibras con los dos tipos de proceso de terminación (sin pulido en la parte superior y con pulido en la inferior) calculadas a partir de las atenuaciones promedio de las figuras 15 y 16 y de los coeficientes de difusión promedio de los diagramas de la figura 17. Todas las imágenes se han normalizado al máximo común de todas ellas para poder comparar los efectos de la atenuación en cada caso.

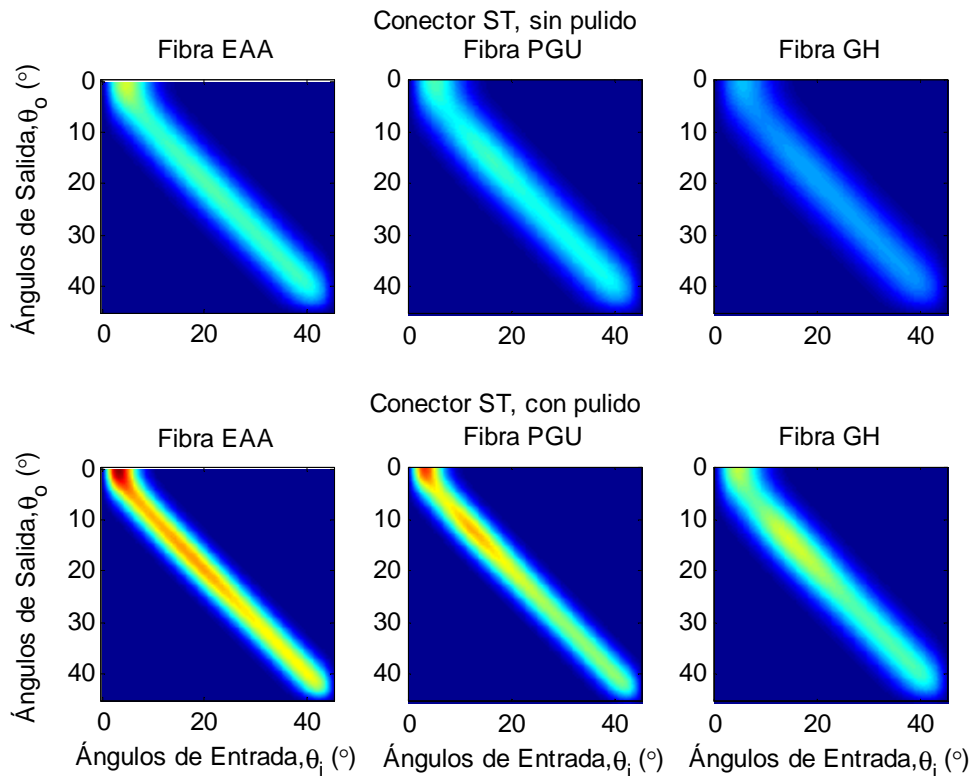


Figura 18: Matrices del conector ST con y sin el efecto del pulido

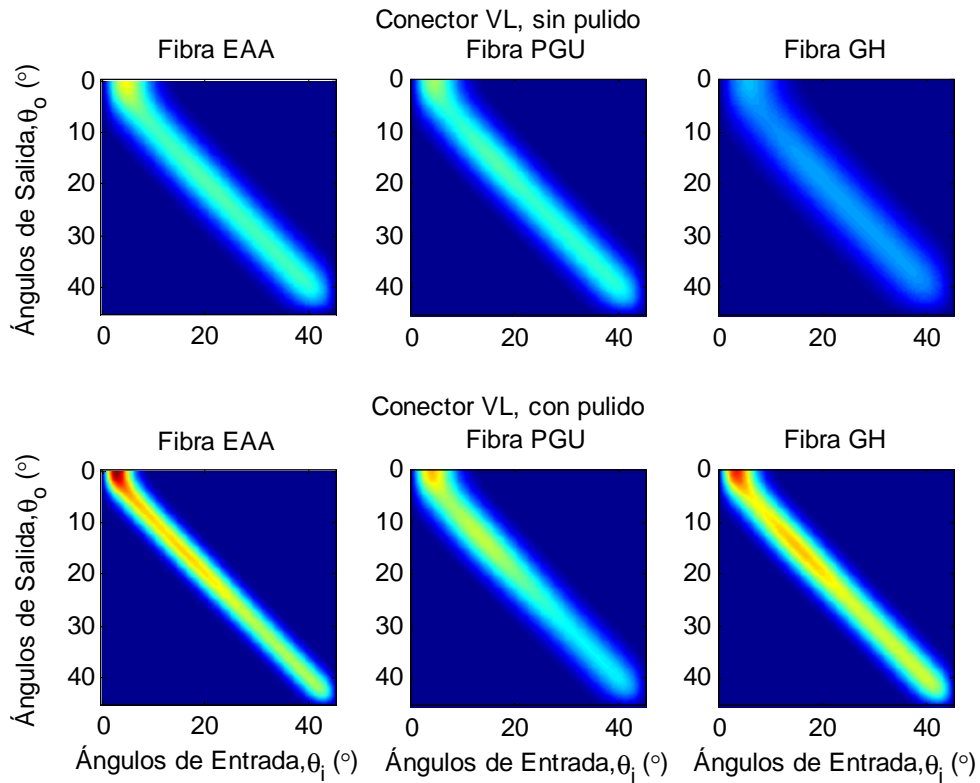


Figura 19: Matrices del conector VL con y sin el efecto del pulido

Las imágenes de las matrices revelan las mismas conclusiones comentadas al comparar las funciones de atenuación y la difusión obtenida para cada fibra y conector. En cada una de las figuras, comparando las matrices para cada fibra, puede verse como el proceso de pulido disminuye tanto la atenuación como la difusión, particularmente para la GH. En el caso sin pulido, las matrices características de una fibra con los dos conectores analizados son muy similares. De hecho, para las fibras EAA y GH sin pulir, puede decirse que se podría utilizar una única matriz para modelar los dos tipos de conector estudiados. Con el proceso de pulido, sin embargo, se aprecian más diferencias para una misma fibra con distinto conector y también las diferencias entre fibras son más acentuadas. Esto puede ser un efecto de la mayor variabilidad introducida por el proceso de pulido, como ya se ha discutido anteriormente. Por esta razón, un mayor número de medidas permitiría obtener unas conclusiones más definitivas respecto a las matrices características de cada fibra con el proceso de pulido.

Capítulo 3: MODELO MATRICIAL DEL SISTEMA FIBRA-CONECTOR

Una vez obtenido el modelo del conector se va combinar con el modelo matricial de propagación de potencia en la fibra, cuya base se describe con detalle en el anexo II y, algo más brevemente, en el apartado 3.1 de este capítulo. Este modelo se basa en una matriz de propagación que se obtiene a partir de dos funciones características del tipo de fibra: la atenuación y la difusión. En el apartado 3.2 se presenta un nuevo método para la estimación experimental de los parámetros que caracterizan las funciones de atenuación y difusión, basado en medidas en fibras cortas. La matriz del conector se va a introducir en el modelo de propagación para estudiar el comportamiento del sistema conjunto fibra-conector con el conector en distintas posiciones. Para validar el modelo conjunto, se comparan las predicciones del modelo con datos experimentales de distribución de potencia y ancho de banda obtenidos para la fibra EAA utilizando el conector ST en el apartado 3.3. Finalmente, en el apartado 3.4 se estudia el impacto de la presencia de conectores en distintas posiciones de un enlace para distintas condiciones.

3.1 Modelo matricial de propagación de potencia óptica en fibras de plástico

El modelo de propagación utilizado se basa en la ecuación de flujo de Gloge (13)(14) que describe la evolución de la distribución de potencia modal cuando es transmitida por una POF y en la que el ángulo de propagación respecto al eje de la fibra, θ , está considerado como una variable continua descrita por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial z} = -\alpha(\theta)P(\theta, z, t) - \frac{n}{c \cos \theta} \cdot \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \cdot d(\theta) \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial \theta} \right), \quad [3.1]$$

Donde $P(\theta, z, t)$ describe la distribución de potencia óptica en función de θ , de la longitud de fibra, z , y del tiempo, t , mientras que $\alpha(\theta)$ y $d(\theta)$ son las funciones angulares de atenuación y difusión características para cada tipo de fibra (5).

Para resolver la ecuación [3.1] se aplica un método de diferencias finitas, de tal forma que, dada la potencia angular para una longitud inicial, z_1 , la distribución de potencia para una longitud mayor, z_2 , puede ser calculada con la siguiente ecuación matricial:

$$\mathbf{p}(z_2, \omega) = (\mathbf{A}(\omega) + \mathbf{D})^m \cdot \mathbf{p}(z_1, \omega). \quad [3.2]$$

En la ecuación anterior, $\mathbf{p}(z_1, \omega)$ y $\mathbf{p}(z_2, \omega)$ son vectores columna que describen la distribución angular de potencia en el dominio frecuencial para dos longitudes de fibra cuya diferencia es m veces la longitud básica. De forma similar a los vectores de potencia definidos para caracterizar el conector en el capítulo anterior, cada componente k del vector es la potencia en el ángulo de propagación discretizado $\theta = k \cdot \Delta\theta$, pero además teniendo la dimensión adicional de la frecuencia. Escogiendo una longitud básica Δz suficientemente pequeña, el valor del entero m se puede obtener para cualquier par de longitudes, $z_2 > z_1$ como $m = \frac{z_2 - z_1}{\Delta z}$.

La matriz $\mathbf{M} = (\mathbf{A}(\omega) + \mathbf{D})$, que denominaremos matriz de propagación, lleva toda la información espacio-temporal correspondiente a la potencia de propagación a través de la fibra y por consiguiente da una descripción completa de la fibra como sistema de transmisión. Las matrices \mathbf{A} y \mathbf{D} se calculan para cada tipo de fibra a partir de las funciones $\alpha(\theta)$ y $d(\theta)$ con las expresiones dadas en la ecuaciones [II.6] y [II.7] del anexo II, cuya estimación a partir de un nuevo método basado medidas de FFP para tramos cortos de fibra se describe en el apartado 3.2.

Una vez que la condición inicial, dada por la distribución de potencia inyectada en la fibra puesta en forma vectorial, se multiplica por la correspondiente matriz característica de la misma, se obtiene la distribución de potencia, $\mathbf{p}(\theta, z, \omega)$, como función del ángulo de salida, de la frecuencia y de la longitud, para una determinada fuente de entrada.

A partir de $\mathbf{p}(\theta, z, \omega)$ para una serie de valores de z se pueden obtener todos los parámetros relevantes como la respuesta frecuencial en función de la longitud $\mathbf{H}(L, \omega)$ o el ensanchamiento temporal de un pulso para cada ángulo de salida a una determinada longitud, $\mathbf{P}(\theta, L, t)$ que se denominará, de ahora en adelante, distribución de potencia espacio-temporal, a partir de la cual se pueden obtener la repuesta al impulso de la fibra y el perfil radial de su patrón de campo lejano.

3.2 Caracterización de fibras mediante medidas en tramos cortos

Las funciones de atenuación y difusión angulares son necesarias para obtener la matriz de propagación característica de cada fibra. Para las fibras PGU y GH estas funciones fueron previamente determinadas (7) utilizando perfiles radiales obtenidos en función de la longitud de fibra. Las imágenes de FFP a partir de las cuales se extrajeron dichos perfiles radiales se obtuvieron inyectando luz con un láser de semiconductor en la dirección paralela al eje de la fibra. Los perfiles se obtuvieron para una serie de longitudes de fibra partiendo de fibras de más de 100 metros y aplicando el método de corte hasta 10 metros. Esta forma de caracterizar la fibra es poco eficiente ya que el método de corte supone segmentar un carrete en numerosos tramos de fibra cortos, desaprovechando la fibra. Además, al utilizar una fuente de emisión con una apertura relativamente pequeña respecto de la fibra, no aporta suficiente información sobre la propagación en ángulos altos. Por ello, con el objetivo de caracterizar la nueva fibra EAA se ha diseñado un nuevo método que, aunque está basado también en perfiles radiales experimentales, utiliza fibras cortas y barrido angular en la inyección para aumentar la precisión.

El protocolo de medida establecido es el siguiente: se parte de un tramo de fibra de 10 metros y se realizan medidas de FFP en función del ángulo de entrada de la misma forma que para la caracterización del conector. Este tramo se corta en dos iguales y se obtiene de nuevo el FFP inverso para el segmento de 5 metros que sigue en el sistema de inyección. Este proceso se repite sucesivamente hasta llegar a la medida de 1 metro, que consideraremos una estimación de la matriz de inyección de esta fibra que también es necesaria para el modelo matricial como se describe en el anexo II y que se muestra en la figura 20. Esta matriz, junto con la medida para la fibra de 5 metros, se utiliza para determinar los parámetros libres de las funciones de atenuación y difusión características de la fibra mientras que con las medidas restantes se realiza una validación del ajuste.

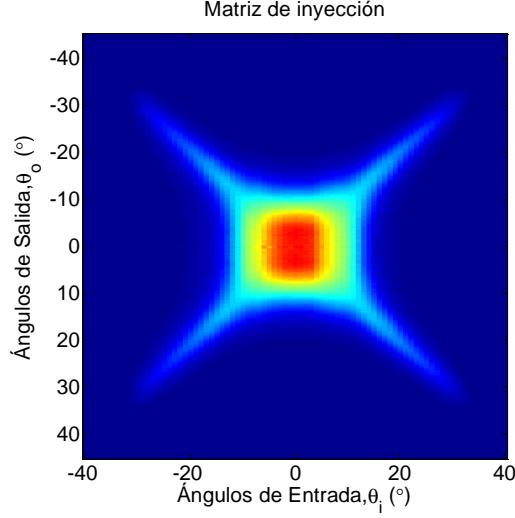


Figura 20: Matriz de inyección usada para la fibra EAA

La función de difusión angular se modela como se hizo en (7), con una bisigmoide determinada por cuatro parámetros según la siguiente ecuación:

$$d(\theta) = D_0 + D_1 / (1 + D_2 \cdot e^{\sigma_d^2 \theta^2}) \quad [3.3]$$

Donde θ es el ángulo de propagación externo. La atenuación se modela con la siguiente función:

$$\alpha(\theta) = (1 + a_1 \cdot (\theta/\theta_0)^8) \quad [3.4]$$

Siendo θ_0 el ángulo de referencia, que se fija en 30° , coincidiendo con el ángulo de aceptación.

Los valores de los parámetros se obtienen minimizando el error entre los perfiles radiales experimentales y simulados para la longitud de 5 metros. Se ha elegido esta longitud porque en ella los efectos de la propagación son ya apreciables pero sin excesiva atenuación en los ángulos altos. Si se denomina \mathbf{M}_4 a la matriz de propagación de la fibra para 4 metros, \mathbf{P}_1 a la matriz de la medida de 1 metro y \mathbf{P}_5 a la matriz de la medida de 5 metros, la función de coste viene definida por:

$$f_{coste} = norm(\mathbf{P}_5^{exp} - \mathbf{P}_5^{sim}) \quad [3.5]$$

$$\mathbf{P}_5^{sim} = \mathbf{M}_4 \cdot \mathbf{P}_1^{exp} \quad [3.6]$$

La matriz \mathbf{M}_4 se calcula como una potencia de la matriz básica \mathbf{M} de igual forma que se hizo en el apartado anterior para la matriz del conector.

Los parámetros obtenidos para la fibra EAA son los siguientes:

$$D_0 = 6.4758 \cdot 10^{-5}, D_1 = 0.0033, D_2 = 1.78, \sigma_d = 10.32, a_1 = 0.04$$

Una vez caracterizada la fibra con la matriz básica, para la cual $dz = 1 \text{ mm}$, podemos simular la propagación en cualquier longitud de fibra elevándola a la potencia requerida. Por ejemplo, si se quiere simular el efecto de 10 metros de fibra óptica, se eleva esa matriz a 10000.

Para comprobar la validez del ajuste, en la figura 21 se muestran las matrices de perfiles radiales simuladas para 2.5, 5 y 10 metros junto con las medidas experimentales sin conector. Estas simulaciones se obtienen multiplicando la matriz P_1 por la de propagación de la fibra para la correspondiente longitud.

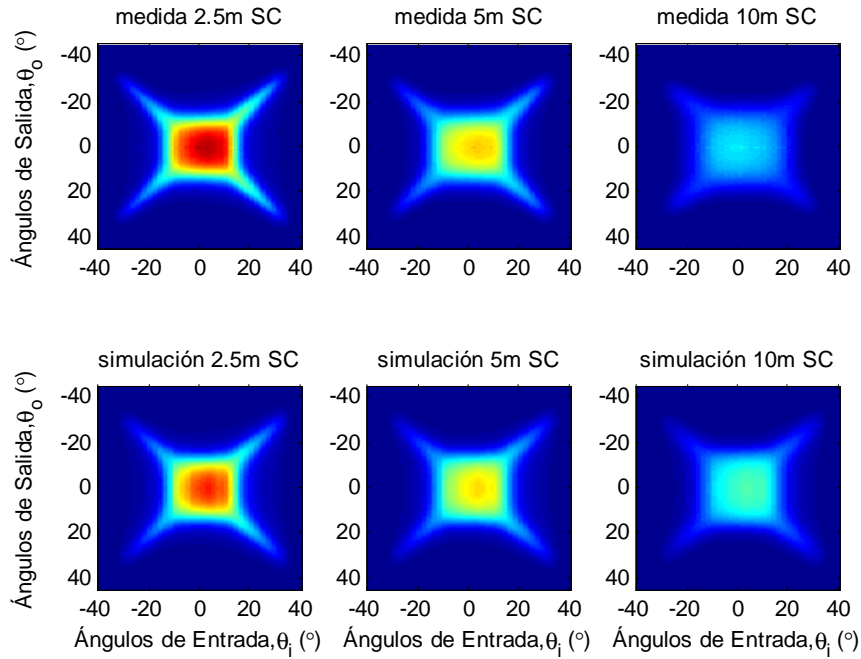


Figura 21: Comparación de las medidas de 2.5, 5 y 10 metros con sus simulaciones

Se puede ver que las simulaciones reproducen, de forma bastante fiel, los resultados experimentales, no sólo para 5 metros, sino también para las otras dos longitudes que no se han utilizado en el proceso de ajuste. Esta imagen y la siguiente se han normalizado al máximo de la potencia de la matriz medida de 2.5 metros. Los errores de la tabla 5 se calculan mediante la norma de la diferencia entre la medida y la simulación de cada longitud y se muestran divididos entre el máximo de la medida sin conector. Como era de esperar son menores para 5 metros ya que es esta la longitud utilizada para el proceso de ajuste de los parámetros libres del modelo.

Error 2.5m SC	Error 5m SC	Error 10m SC
6.7246	4.2578	15.4444

Tabla 5: Errores de los tramos sin conector

3.3 Validación del modelo conjunto con medidas con fibras cortas

En este apartado, se va a validar el modelo conjunto de propagación por la fibra y conector comparando medidas experimentales y resultados de la simulación para la fibra EAA y el conector ST sin aplicar el proceso de pulido. En primer lugar, se comparan barridos angulares

de perfiles radiales en tramos de fibra cortos en los que se ha insertado un conector. Después, se compararan anchos de banda y potencia en función de la longitud de fibra, para varias posiciones del conector.

3.3.1 Medidas de FFP con conector en fibras cortas

En el protocolo de medida aplicado a los 10 metros de fibra, descrito en el apartado anterior, se ha obtenido también el barrido del perfil radial uniendo los segmentos cortados mediante un conector ST. Por ejemplo, después de cortar 5 metros del tramo de 10 metros, se insertaron conectores y se obtuvo el barrido de perfiles para los dos tramos de 5 metros unidos con un conector. Estas medidas, se han simulado utilizando el modelo de la fibra determinado en el apartado anterior y modelando el conector ST mediante la matriz promedio obtenida en el capítulo 2.

A continuación se muestran las ecuaciones matriciales que describen las distintas configuraciones medidas y simuladas y la comparación de las medidas con las simulaciones en la figura 22, demostrando que el modelo de conector produce resultados similares a los experimentales.

$$P_{10cc}^{sim} = M_5 \cdot M_{ST} \cdot M_4 \cdot P_1 \quad [3.7]$$

$$P_{5cc}^{sim} = M_{2.5} \cdot M_{ST} \cdot M_{1.5} \cdot P_1 \quad [3.8]$$

$$P_{2.5cc}^{sim} = M_{1.5} \cdot M_{ST} \cdot P_1 \quad [3.9]$$

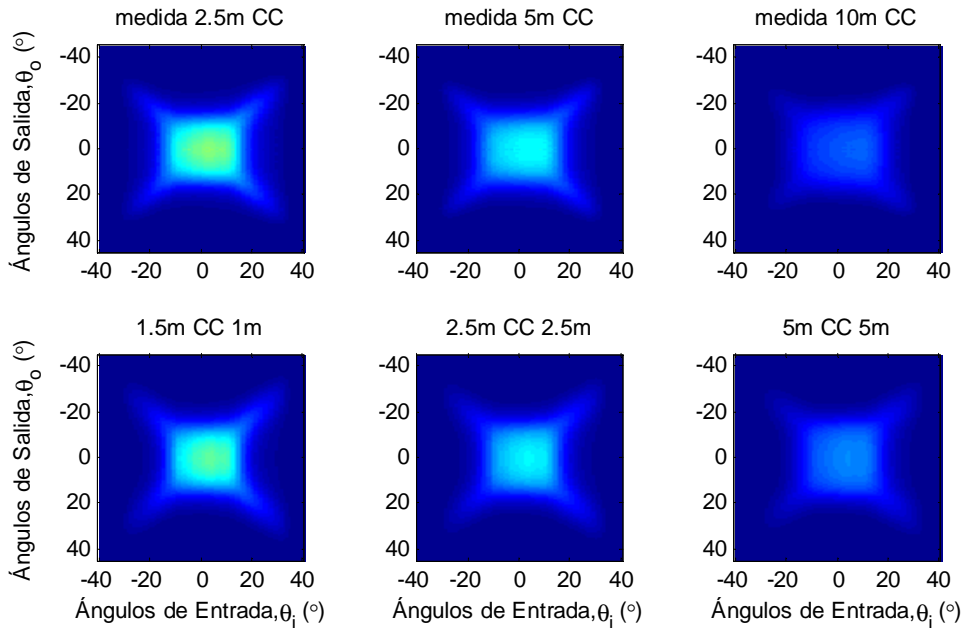


Figura 22: Comparación de las medidas de 2.5, 5 y 10 m con sus simulaciones

Los errores se calculan de la misma forma que el caso anterior y se muestran en la tabla 6. Se observa que el error obtenido al hacer la simulación de 5 metros, vuelve a ser menor que para las otras dos medidas.

Error 2.5m CC	Error 5m CC	Error 10m CC
7.3387	6.9707	12.1477

Tabla 6: Errores de las medidas de 2.5, 5 y 10 m con conector

3.3.2 Medidas de potencia y ancho de banda en función de la longitud de fibra

Para comprobar que, además de los parámetros espaciales, el modelo es capaz también de reproducir los temporales, se han medido los anchos de banda en función de la longitud, determinados a partir de medidas experimentales de respuesta en frecuencia. Para ello, se ha partido un carrete de 63 metros de fibra EAA y se ha obtenido la respuesta en frecuencia para una serie de longitudes utilizando el método de corte. Las medidas se realizaron en tres condiciones, sin conector, insertando un conector ST próximo al transmisor e insertando un conector ST próximo al receptor.

En la primera parte se describe el sistema experimental y protocolo utilizado para hacer las medidas de la respuesta en frecuencia. Además de determinar el ancho de banda en función de la longitud, también se midió la potencia óptica en las mismas condiciones experimentales. En la segunda parte se comparan las simulaciones con dichas medidas y se hace una valoración de los resultados.

3.3.2.1 Descripción del sistema experimental y medidas

La figura 23 muestra el esquema del montaje experimental basado en el utilizado en un trabajo anterior, pero donde en lugar de procesar los datos recogidos por un osciloscopio se ha utilizado un analizador escalar de redes (9). El transmisor se basa en un láser de diodo AlGaInP (LD SANYO Single Mode Sharp GH6510B2A) que emite un máximo de 10 mW a 654 nm y con una divergencia normal de 30° en el plano perpendicular, y de 7.5° en el plano paralelo. El LD se monta sobre un dispositivo Thorlabs TCLDM9 LD-TEC con un paso de banda de 100 kHz a 1 GHz. La intensidad y la temperatura del LD son controladas por un Thorlabs ITC-502 que garantiza su estabilidad. El sistema receptor consiste en un circuito basado en un fotodiodo de 1,2 mm de diámetro (S5971) con una resistencia de carga 50 Ω . Su salida, que es muy débil, se introduce en un amplificador de 40dB (Mini-Circuits ZKL-1R5) con un paso de banda de 10 MHz a 1.5 GHz. A la salida del amplificador está conectado el analizador de espectros Infinium DCA de Agilent86100A, desde donde se envían los datos por GPIB a un ordenador dotado de un software diseñado específicamente para esta aplicación, capturando y procesando de esta manera los datos de respuesta en frecuencia.

Para realizar las medidas experimentales se parte de una longitud de 63 metros y se aplica el método de corte hasta una de 10 metros. Para cada una de ellas se hace primero una medida de potencia con el medidor de potencia FOTEC y después, se obtiene la respuesta en frecuencia para ese tramo de POF. Entonces se corta un tramo de 10 metros de fibra y se conectorizan ambos extremos. De esta forma se obtiene la potencia y la respuesta en frecuencia con el conector insertado en el extremo más próximo al emisor, y después se intercambian los extremos de la fibra dejando el conector más cercano al extremo conectado al receptor. Así se obtienen para cada longitud una medida sin el conector, una medida con el conector cerca del emisor (CE) y otra cerca del detector (CD), tanto de potencia como de respuesta en frecuencia. Un ejemplo de estas funciones se muestra en la figura 24 en las tres condiciones, con el eje vertical en decibelios. El ancho de banda se calcula en cada longitud de

fibra como la frecuencia a la cual la amplitud de una señal sinusoidal modulada es reducida a $\frac{1}{2}$ del máximo (ancho de banda óptico a 3 dB), como se define en el anexo I.

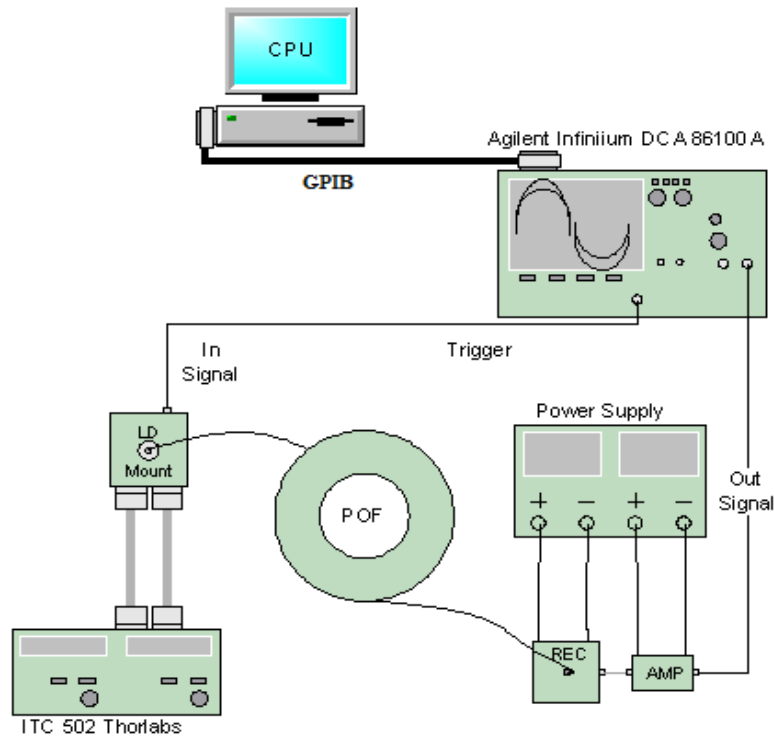


Figura 23: Esquema del sistema experimental para obtener anchos de banda en POFs

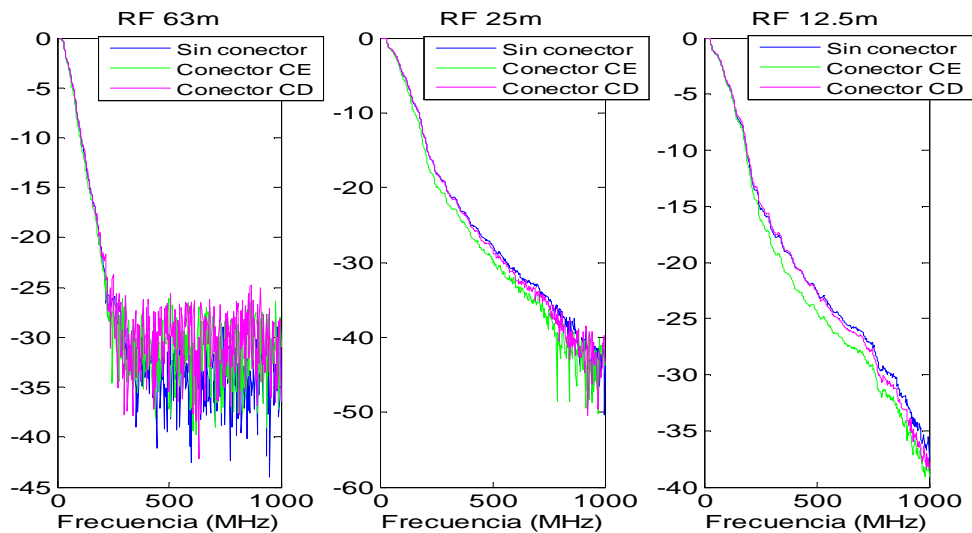


Figura 24: Medidas de respuesta en frecuencia normalizadas para las tres condiciones señaladas

3.3.2.2 Simulación y comparación

Con las medidas de respuesta en frecuencia se obtienen los anchos de banda experimentales que se han representado en la figura 25 mediante diferentes símbolos para cada condición. Estas medidas sirven para caracterizar las propiedades de transmisión de la fibra EAA así como el efecto de los conectores. Los anchos de banda muestran el mismo comportamiento que los

obtenidos en (8). Por ejemplo, en 50 metros se tiene un ancho de banda de 100 MHz aproximadamente.

Por otra parte, se ha utilizado un modelo matricial para simular el ancho de banda y la potencia en las mismas condiciones para verificar su validez.

El ancho de banda obtenido con la simulación refleja bien la tendencia de los resultados experimentales como ya se obtuvo en otros análisis (6) (8). La concordancia entre las simulaciones y las medidas experimentales es algo peor para las fibras más cortas, ya que en éstas, los distintos factores (calidad del corte, curvaturas, etc.) tienen un mayor impacto que para las longitudes mayores. El acuerdo es razonable si se tiene en cuenta que con el método de corte, los defectos o presiones espacialmente localizados en un punto de la fibra, desaparecen cuando se corta dicho segmento y hacen que las simulaciones no reflejen fielmente la realidad.

Aunque las diferencias entre las tres condiciones son relativamente pequeñas, se observa que, para el conector situado en el emisor, los anchos de banda son menores que los obtenidos para el conector situado en el detector, siendo éstos últimos más parecidos a los resultados que se obtienen sin conector. Las diferencias al introducir el conector en una u otra posición son mayores para longitudes cortas, pero al aumentar la longitud todas las rectas tienden a converger al mismo valor. Estos efectos son similares a los obtenidos con otro dispositivo, el scrambler, que se caracterizó en un proyecto anterior, aunque las diferencias entre las distintas condiciones testeadas fueron mayores en dicho caso.

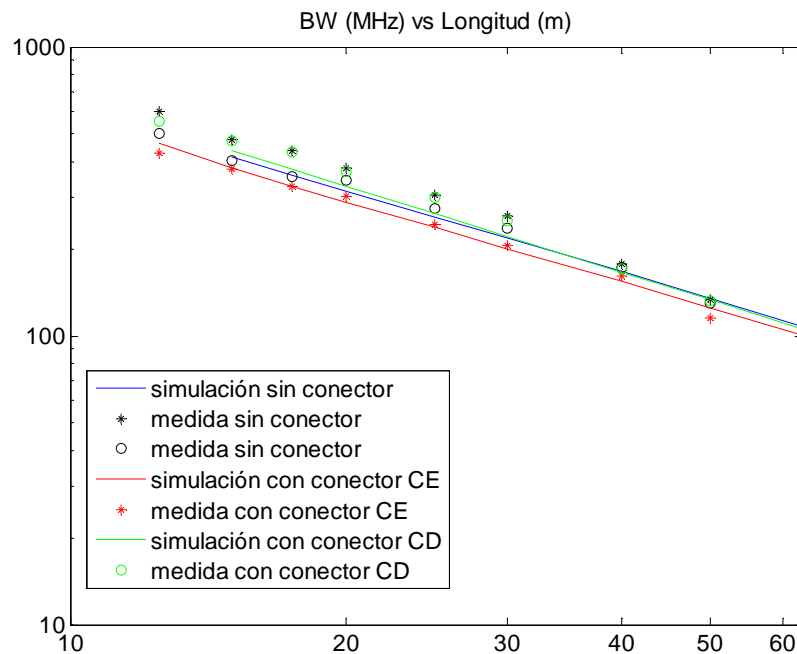


Figura 25: Medidas y simulaciones de ancho de banda en función de la longitud de fibra

Para terminar, en la figura 26, que muestra la potencia, se observa como el logaritmo de ésta disminuye cuando aumenta la longitud de forma aproximadamente lineal y que las medidas y simulaciones coinciden. Al insertar el conector en la fibra disminuye la potencia respecto a la medida sin conector, en un valor similar para ambas posiciones del conector.

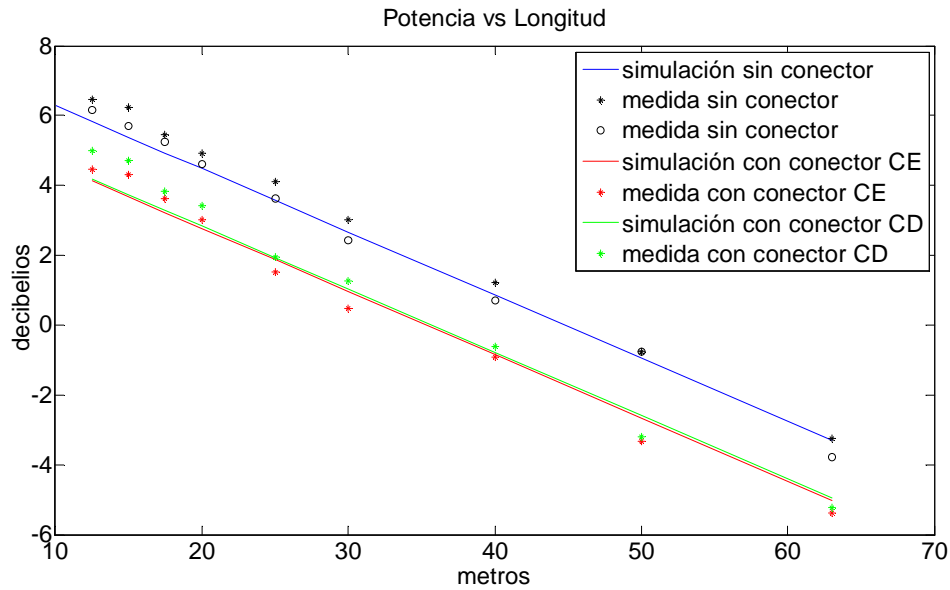


Figura 26: Medidas y simulaciones de potencia en función de la longitud de fibra

3.4 Impacto del conector en un enlace de POF

Una vez comprobado que el modelo conjunto fibra-conector reproduce correctamente el comportamiento de la fibra con el conector, se puede utilizar para predecir sus efectos en otros casos. Aquí se va a estudiar el efecto que tiene la fuente óptica en la que se basa el emisor con la fibra EAA sobre la potencia y el ancho de banda, insertando un conector ST en diferentes puntos del enlace.

Se ha utilizado de nuevo la matriz promedio característica del conector ST con la fibra EAA para simular la potencia óptica y el ancho de banda en un sistema con el conector situado a 50 cm del emisor o a 50 cm del receptor. El caso sin conector se ha simulado también para establecer un nivel de comparación. Este estudio se ha realizado para tres tipos de fuente caracterizadas por su anchura total a media altura, *Full Width Half Maximum* (FWHM), siendo ésta de 5°, 30° o 60°. Estas anchuras abarcan desde la condición de inyección de potencia sólo en ángulos muy bajos (*underfilled*), hasta la de inyección en todos los ángulos por debajo del ángulo crítico de estas fibras (*overfilled*). La condición intermedia testada corresponde a la de un láser semiconductor estándar para aplicaciones de POF en comunicaciones.

En la imágenes de la figura 27, se muestran las atenuaciones (izquierda) y los anchos de banda (derecha) para las fuentes de FWHM=5°, FWHM=30°, FWHM=60°, siendo la de 30° la más convencional. En la parte izquierda se observa lo mismo que en el figura 26.

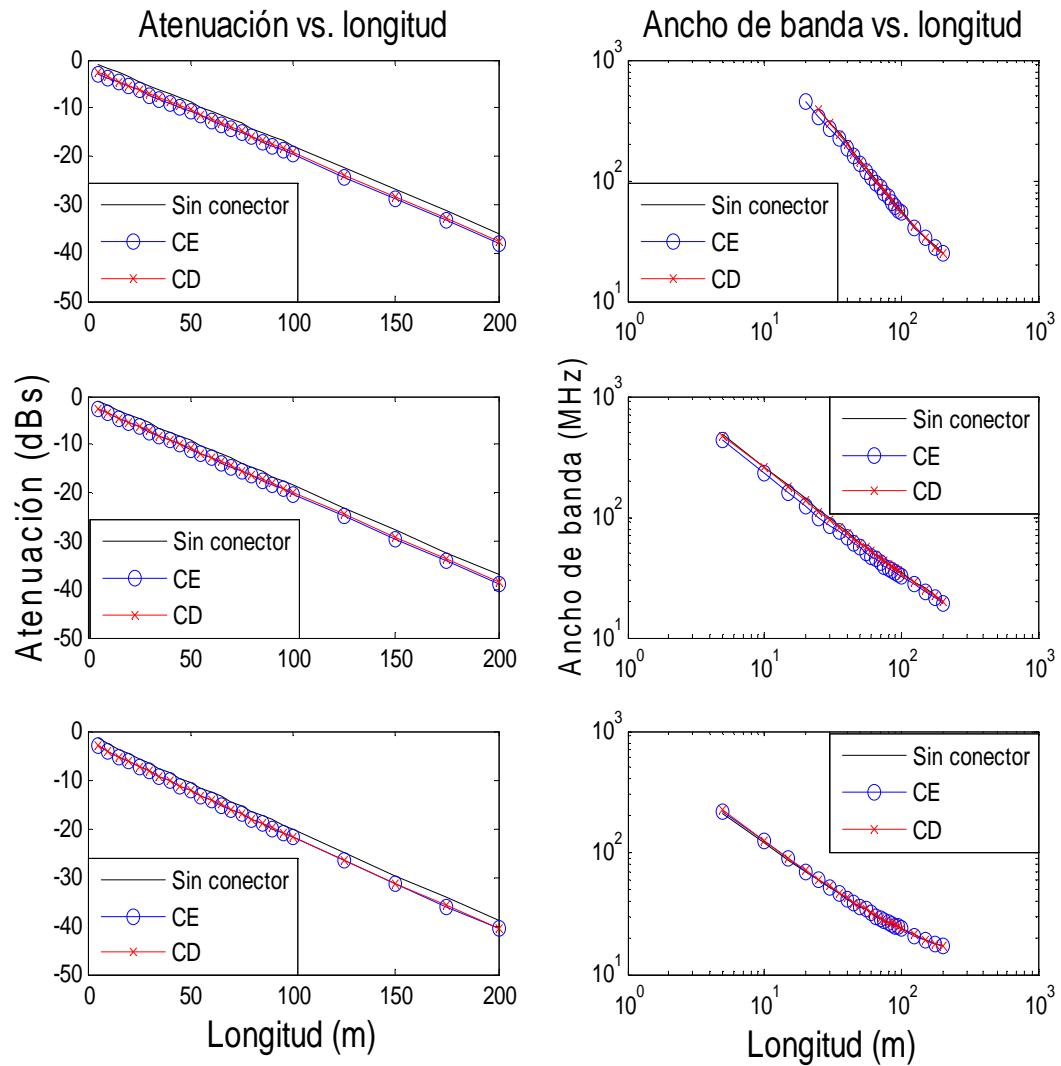


Figura 27: Simulación de la atenuación (izda) y del ancho de banda (dcha) en función de la longitud de fibra sin conector y con el conector ST insertado a 50 cm del emisor o a 50 cm del receptor con a) $FWHM=5^\circ$, b) $FWHM=30^\circ$, c) $FWHM=60^\circ$

La atenuación sigue una línea recta con la misma pendiente de forma prácticamente independiente de la posición del conector y creciendo ligeramente al aumentar la anchura de la fuente. Las pérdidas que impone el conector son algo menores cuando el conector está a 50 cm del detector. En cuanto a la anchura de la fuente, las mayores pérdidas se dan para las más estrechas.

En los gráficos de la derecha de la figura 27, donde se representan los anchos de banda en coordenadas logarítmicas frente a la longitud también en logaritmos, se ve claramente como la pendiente disminuye para fuentes más anchas, lo que coincide con resultados experimentales anteriores (15). El ancho de banda cuando el conector está a 50 cm del emisor es siempre algo menor al ancho de banda sin conector y muy similar cuando se encuentra cerca del detector. Esta diferencia es mayor para la fuente de anchura 30° que es precisamente la más próxima a las fuentes convencionales para comunicaciones con fibra de plástico. Para precisar más el comportamiento observado para esta fuente, en la figura 28 se presenta el producto ancho de

banda por longitud para la fuente de anchura 30° . En la figura se ve como el producto empeora para cualquiera de las dos posiciones del conector, aunque más cuando éste está cerca del emisor. Este resultado difiere respecto al obtenido con un scrambler situado a 20 cm cerca del receptor. Para esta condición se encontró un incremento del ancho de banda ya que el dispositivo actúa como un filtro espacial (6).

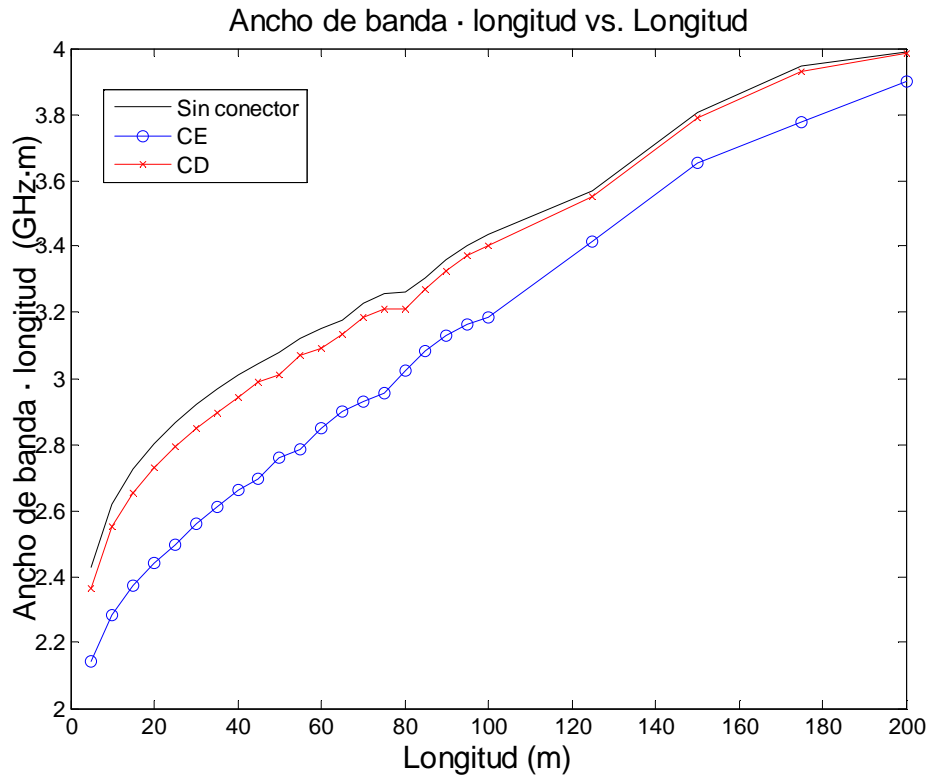


Figura 28: Simulación de la capacidad del sistema en función de la longitud de fibra sin el conector y con el conector ST insertado a 50 cm del emisor o a 50 cm del receptor con una anchura de fuente de $FWHM=30^\circ$

Capítulo 4: CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las principales aportaciones de este proyecto, resumiendo las conclusiones obtenidas, así como sus posibilidades de continuación. Para terminar se ofrece una valoración general del mismo.

4.1 Aportaciones del PFC

El objetivo fundamental de este proyecto ha sido la caracterización y modelado matricial de conectores para fibra de plástico. Para ello, se ha utilizado un método experimental controlado por ordenador y que permite obtener perfiles radiales a partir de imágenes de patrones de campo lejano, en función del ángulo de inyección de forma automatizada.

Con las medidas realizadas con este sistema para fibras cortas se han obtenido los parámetros que definen las funciones de atenuación y difusión angulares de una fibra y que son necesarias para obtener la matriz de propagación de la misma. Este método basado en fibras cortas supone una mejora en la eficiencia del proceso de caracterización respecto al utilizado en trabajos anteriores y que estaba basado en medidas en carretes de fibra, utilizando el método de corte.

Por otro lado, siguiendo un protocolo experimental similar al aplicado en la caracterización de un scrambler, se han obtenido medidas para caracterizar los efectos de dos tipos de conectores (VL y ST) en tres tipos de fibra. En este proyecto se ha propuesto un modelo de conector basado en una matriz tridiagonal básica, elevada a una potencia que refleja los fuertes efectos difusivos que tienen lugar en el conector de forma localizada. Los parámetros del modelo se han ajustado utilizando las medidas experimentales mencionadas.

Además, se ha realizado un análisis de las pérdidas de inserción que ha permitido concluir que las herramientas de terminación tienen un gran impacto, tanto en las pérdidas como en la distribución de potencia, siendo necesario analizar diferentes herramientas para encontrar la más adecuada para cada tipo de fibra.

De acuerdo con lo anterior, hemos encontrado diferencias entre las matrices características dependiendo del tipo de fibra y del tipo de proceso de terminación aplicado. Aunque, en general, los dos tipos de conector estudiados (ST y VL) producen resultados similares, cada uno tiene una matriz característica diferente que depende del tipo de fibra y de cómo se realiza su terminación. Se puede concluir pues, que, las características de la fibra tienen un gran impacto en la conectorización.

El modelo del conector ST para la fibra EAA obtenido utilizando el método de terminación más simple, se ha usado para validar el modelo matricial conjunto fibra-conector, comparando las simulaciones con medidas de distribución de potencia y de ancho de banda en función de la longitud. Para realizar estas últimas medidas fue necesario poner a punto un sistema de medida de respuesta en frecuencia. Esta serie de medidas ha permitido caracterizar la capacidad de transmisión de la fibra EAA y el impacto sobre el ancho de banda del conector en distintas posiciones de la misma.

Para terminar, los efectos del conector en distintas posiciones de una red se han analizado simulando su influencia para fuentes ópticas de distinta apertura, revelando que las pérdidas que introduce el conector son prácticamente independientes de su posición en la red y de la anchura de la fuente. Por otra parte, la presencia del conector, ya se sitúe próximo al emisor o al detector, tiene el efecto de disminuir el producto $BW \cdot L$ (ancho de banda por longitud).

4.2 Posibilidades de continuación y mejora del trabajo

El modelo matricial y el protocolo de caracterización utilizado aquí para los dos conectores analizados se puede utilizar para otros dispositivos pasivos usados en fibras ópticas de plástico, incluso, para perturbaciones, como por ejemplo, las curvaturas en ángulo recto que aparecen frecuentemente en las instalaciones en espacios reducidos como la casa o el avión. El modelado de los efectos de estos dispositivos mediante una matriz, junto con el modelo de propagación, permitirá además estimar los efectos en fibras de distinta longitud y con condiciones de inyección diferentes, haciendo un análisis similar al realizado en este proyecto.

Una de las conclusiones de este proyecto es el gran impacto que tiene el proceso de terminación sobre la calidad del conector, tanto en cuanto a las pérdidas, como a la redistribución de potencia que produce. El efecto de la técnica de terminación, además, es diferente para cada tipo de fibra. Por ello, sería conveniente realizar un estudio más exhaustivo de los instrumentos y técnicas de terminación (peladoras, cortadoras, pulidoras, etc.) determinando la adecuación de las herramientas en función del material del jacket de la fibra o según el tipo de conector insertado en las fibras, como ya se ha comenzado a hacer en este proyecto.

4.3 Valoración del trabajo

De acuerdo con los objetivos marcados al inicio del proyecto, se ha caracterizado y modelado el conector, validando dicho modelo mediante comparación con datos experimentales y mostrando su potencial para el análisis y diseño de redes de comunicaciones basadas en fibras de plástico.

Primero fue necesario fijar los conceptos propios sobre este tipo de fibra y su aplicación en comunicaciones, así como la toma de contacto con otros trabajos previos que seguían la misma línea.

Una vez que el montaje experimental estuvo listo se procedió al diseño de un protocolo de medida que permitiera la caracterización de los dos conectores. Después de establecer dicho protocolo, se procedió a la toma de medidas experimentales. Estas medidas se obtuvieron para distintas muestras de los diferentes tipos de fibra, para fibras de distinta longitud, y variando la posición del conector (ST o VL, según el caso), de forma que se contara con un banco de datos suficiente para hacer la caracterización y análisis del dispositivo.

El siguiente paso fue convertir las medidas registradas en datos con los que poder trabajar desde el entorno de programación de Matlab[™]. Una vez procesados los datos, se procedió a un periodo de pruebas hasta obtener una caracterización fiable de los dos conectores, lo cual constituye el objetivo principal de este proyecto.

Por otra parte, tanto para la validación del modelo con datos experimentales, como para el estudio y análisis posterior del comportamiento del conjunto fibra-conector para el ancho de banda, ha sido necesario conocer a fondo y modificar convenientemente la mayor parte de los programas que realizan el modelo matricial de propagación en fibras ópticas de plástico.

Puede decirse que el resultado ha sido satisfactorio ya que se han cumplido plenamente todos los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Bibliografía y Referencias

- (1) *"Domestic multimedia network based on POF"*. **J. Mateo, A. Oca, M. A. Losada, J. Zubia**. Santa Clara, USA : s.n., 2008. 17th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications.
- (2) *"Matrix method to solve the differential power flow equation in the frequency domain"*. **J. Mateo, M. A. Losada, A. López**. 2010. 12th Intl. Conf. on Transparent Optical Networks.
- (3) *"Modeling and characterization of SI-POF and connectors for use in an avionic system"*. **N. Antoniades, M. A. Losada, J. Mateo, D. Richards, T. K. Truong, X. Jiang, M. Madamopoulos**. Bilbao, Spain : s.n., 2011. 20th Intl. Conf. on Plastic Optica Fibres and Applications.
- (4) *"Influence of connectors on the performance of a VCSEL-Based standard Step-Index POF link"*. **E. Grivas, D. Syvridis, G. Friedrich**. 24, 15 de December de 2009, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21.
- (5) **M. Osta, M. A. Losada**. *"Análisis de los efectos de un scrambler sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico de salto de índice mediante el modelo matricial de propagación"*. Zaragoza : s.n., 2010.
- (6) *" Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model "*. **M. A. Losada, J. Mateo, J. J. Martínez- Muro**. 2011, IOP Journal of Optics, Vol. 13.
- (7) *"Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers"*. **J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Zubia**. s.l. : 20, 2006, Optics Express, Vol. 14, págs. 9028-9035.
- (8) *"Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation"*. **J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Zubia**. s.l. : 4, 2009, Optics Express, Vol. 17, págs. 2850-2860.
- (9) *"Bandwidth measurement in POF based on general purpose equipment"*. **J. Mateo, M. A. Losada, J. J. Martínez- Muro, I. Garcés, J. Zubia**. 2005, págs. 53-56. 14th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications.
- (10) *"Characterization of the far field pattern for plastic optical fibers"*. **M. A. Losada, J. Mateo, D. Espinosa, I. Garcés, J. Zubia**. Nüremberg, Alemania : s.n., 2004, págs. 458-465. 13th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications.
- (11) *"SI-POF frequency response obtained by solving the power flow equation"*. **M. A. Losada, J. Mateo, J. J. Martínez, A. López**. Santa Clara, USA : s.n., 2008. 17th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications.
- (12) *"Analysis of Propagation Properties of Step Index Plastic Optical Fibers at Non-Stationary Conditions"*. **M.A. Losada, J. Mateo, L. Serena**. Turín, Italia : s.n., 2007, págs. 299-302. 16th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications.

- (13) **Gloge, D.** "*Optical Power Flow in Multimode Fibers*". 1972.
- (14) "*Impulse response of clad optical multimode fibers*". s.l. : 52, 1973. págs. 801-816. Bell Syst. Tech. J.
- (15) **O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum.** "*POF Handbook*". ed. 2nd. s.l. : Springer, 2008.
- (16) "*A pluggable large core step index plastic optical fiber with built-in mode conditioners for Gigabit ultra short reach networks*". **J. Chandrappak, Z. Jing, N. R. Jie, P. Damarugath.** 2010, IEEE Photonics, Vol. 33, págs. 868-875.
- (17) **Japanese Industrial Standard.** "*Test methods for structural parameters of all plastic multimode optical fibres*". Japan : s.n., 1992. JIS C 6862.
- (18) <http://www.i-fiberoptics.com/patchcords.php?id=1>
- (19) <http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=105&cat=pof>
- (20) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=330&cat=stripping>
- (21) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=105>
- (22) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=120&cat=cutting>
- (23) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=110&cat=cutting>
- (24) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=10&cat=kits>
- (25) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=450&cat=polishing>
- (26) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=414&cat=polishing>
- (27) <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=409&cat=polishing>



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE CONECTORES SOBRE LAS PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO

ANEXOS



**Departamento de
Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad Zaragoza**

Anexo I: LA FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO Y PARÁMETROS DE INTERÉS EN COMUNICACIONES

Aunque existen distintos tipos de fibras de plástico, dependiendo fundamentalmente de su perfil de índice, de su tamaño y de los materiales utilizados en su fabricación, nos vamos a restringir a las fibras de perfil de salto de índice (SI-POF), de 1 mm de diámetro y de núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA) que son las que se han utilizado en el proyecto. Aparte de estas características, para describir una fibra óptica existen una serie de parámetros que pueden clasificarse en dos grupos:

- *Parámetros estáticos*: se trata de las características geométricas y ópticas como los diámetros de núcleo y cubierta, la apertura numérica o el perfil de índice de refracción. Son constantes a lo largo de la fibra.
- *Parámetros dinámicos*: son el patrón de campo lejano (FFP), la atenuación y la dispersión, características que afectan a la propagación de la señal a lo largo de la fibra.

La atenuación y la dispersión son los que más nos interesan desde el punto de vista de las comunicaciones, ya que limitan la máxima longitud del enlace, aunque este proyecto se basa en medidas del patrón de campo lejano que se puede relacionar con los anteriores mediante el modelo que se describe en el anexo II.

I.1 Fibra óptica de plástico de salto de índice

Al igual que ocurrió con las fibras ópticas de vidrio, la primera POF fue la de salto de índice (SI-POF). Un cladding simple rodea a un núcleo (o core) homogéneo. Por esta razón, un material protector está siempre incluido en el cable. Las figuras 29 y 30 representan esquemáticamente la curva del índice de refracción. El índice de refracción determina la apertura numérica (NA) y, así, el ángulo de aceptación. El índice de refracción del núcleo se toma siempre como 1.5, siendo el índice del cladding más pequeño.

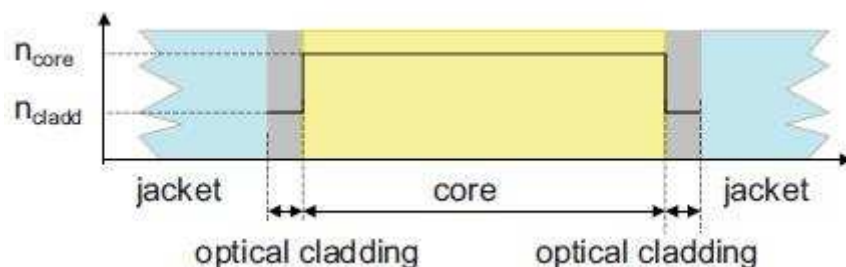


Figura 29: Estructura de una SI-POF

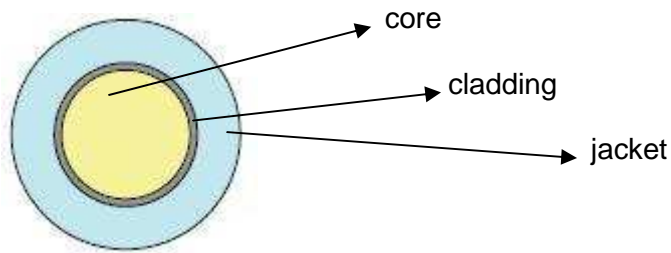


Figura 30: Corte transversal de la SI-POF

- Núcleo/ Core: Hilo de plástico que conduce la luz.
- Revestimiento/ Cladding: Tubo de plástico de distinta densidad óptica que el núcleo. Sirve para confinar la luz en el núcleo.
- Recubrimiento/ Jacket: Recubrimiento que sirve como amortiguador para proteger de daños al núcleo y al revestimiento.

I.1.1 Materiales usados en POF

El material usado más frecuentemente para POF es el termoplástico PMMA, más conocido como Plexiglas®. La figura 31 muestra la estructura del monómero y de su polímero.

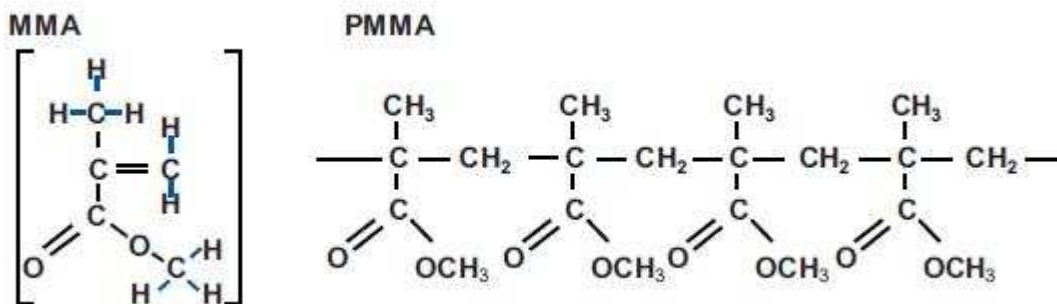


Figura 31: Estructura atómica del PMMA

El PMMA se produce a partir de etileno, ácido cianhídrico y alcohol metílico. Es resistente al agua, lejías, ácidos diluidos, gasolina, aceite mineral y aceite de trementina. El PMMA es un componente orgánico formado por largas cadenas cuyo típico peso molecular es 10^5 . Lo esencial desde el punto de vista de la transparencia óptica del material es la estructura amorfa del material polimerizado. La densidad del PMMA es de 1.18 g/cm^3 . Su resistencia a la tracción es aproximadamente $7-8 \text{ kN/cm}^2$. El índice de refracción del PMMA es de 1.492 y la temperatura de transición del vidrio oscila entre 95°C y 125°C . A temperatura ambiente y humedad relativa del 50%, el material puede absorber hasta 1.5% de agua, lo cual afecta a las características de atenuación.

Aparte de los materiales usados en el núcleo de la fibra, el material utilizado para el jacket también es importante. Tiene una contribución significativa en la resistencia térmica. Además, el jacket determina las propiedades mecánicas del cable, tales como la resistencia a la carga de compresión y la resistencia a la tracción, así como la flexibilidad y la longitud tensora. El uso de PVC (cloruro de polivinilo), PE (polietileno) o PA (poliamida) como materiales de recubrimiento

típicos en aplicaciones de construcción permiten los máximos rangos de temperatura, desde 70°C hasta 90°C. En el caso de nuestro proyecto, el jacket de todas nuestras fibras es de polietileno.

I.2 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_1) es siempre superior al del cladding (n_2), por lo que todas las ondas que se propagan en el interior de una fibra e inciden con un ángulo mayor al ángulo crítico, son reflejadas por el cladding con un ángulo igual al de incidencia.

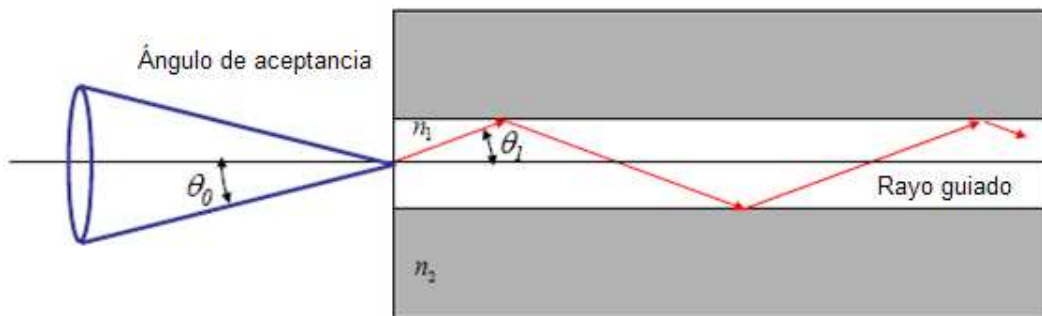


Figura 32: Propagación de las ondas en el interior de una fibra óptica

En la figura 32 se ve el ángulo de aceptación, que es el ángulo máximo con el que se debe incidir sobre el núcleo (θ_0). Está directamente relacionado con los índices de refracción del núcleo y del cladding, que determinan la NA y que cumple la siguiente relación:

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

Entonces la ecuación que proporciona el ángulo de aceptación de una determinada fibra es:

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

La NA típica de la POF es grande, yendo normalmente de 0.46 a 0.50. Una NA grande favorece el acoplamiento de la luz, pero va en detrimento del ancho de la fibra, con lo que está inversamente ligado, por eso también se fabrican actualmente fibras SI POF con NA menores, que precisamente se conocen como fibras de ancho de banda mejorado, con valores alrededor de 0.3 como Raytela™ de Toray.

I.3 Patrón de campo lejano

El patrón de campo lejano (FFP) es la distribución espacial de potencia óptica en función de los ángulos de salida a una distancia suficientemente alejada de la fibra.

La forma de la FFP a la salida de la POF está determinada por la distribución modal, que depende de la longitud de la fibra, de las condiciones de inyección y de la difusión propia de la misma. Conviene distinguir la *apertura numérica a la salida de la fibra* (que a partir de ahora llamaremos NA) que es un valor que depende de distintos factores (condiciones de inyección,

longitud de la fibra, etc.) de lo que normalmente se conoce como *apertura numérica nominal* definida en la ecuación [I.1].

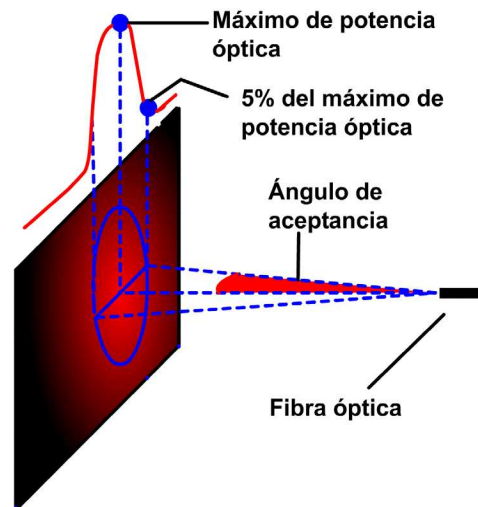


Figura 33: Obtención del ángulo de aceptación

La apertura numérica de salida y la apertura numérica nominal se suelen obtener y medir utilizando las directrices de la normativa del “Japanese Industrial Standard” (17), que comprende varias técnicas para la medición de parámetros estructurales de la fibra óptica de plástico. De todas ellas, solo la técnica basada en la obtención del patrón de campo lejano puede utilizarse para obtener la apertura numérica de salida de la fibra. La técnica basada en FFP consiste en la utilización de un detector o conjunto de detectores ópticos para registrar la dependencia de la misma en función del ángulo de salida y de esta forma, obtener la evolución del patrón de campo lejano en una dirección. En dicha normativa, se especifica que el registro de potencia debe realizarse a una distancia lo suficientemente grande comparada con el diámetro del núcleo de la fibra óptica. La dependencia angular del campo lejano es suficiente para obtener la NA como el seno del ángulo de aceptación, definido como el ángulo para el cual la potencia decrece al 5% de su valor máximo.

I.4 Atenuación

La potencia de luz transportada por una fibra óptica se atenúa durante su propagación. La luz es absorbida en distinta medida por el medio a través del que pasa y sufre el scattering por ese medio o por la interfaz núcleo-cubierta. La reducción en potencia entre los dos extremos de un tramo de fibra se expresa en decibelios, a través de la siguiente relación:

$$\alpha = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \quad [I.3]$$

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

I.4.1 Causas de la atenuación

Los mecanismos que provocan las pérdidas ópticas en la POF pueden ser de origen intrínseco, por la propia constitución de la fibra, o extrínseco, debido a causas como los procesos de fabricación, el envejecimiento, el tendido, etc.

- *Pérdidas intrínsecas:* Dependen principalmente del material del que se compone la fibra y no pueden reducirse sin cambios drásticos en su composición. Este tipo de pérdidas suelen ser de dos tipos: pérdidas por absorción o pérdidas por scattering Rayleigh. El mecanismo de absorción se debe a la interacción existente entre los fotones que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo (Carbono-Hidrógeno). El scattering de Rayleigh es un fenómeno de difusión que se produce cuando la luz encuentra en su camino partículas extrañas al medio continuo, cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda de la señal, La difracción resultante absorbe parte del espectro electromagnético de la señal, produciéndose una pérdida de energía.
- *Pérdidas extrínsecas:* Están relacionadas con el procesado del material y la fabricación de la fibra y por lo tanto pueden reducirse perfeccionando estos procedimientos. Incluyen pérdidas debidas a impurezas en la fibra como polvo o micropartículas, o a imperfecciones en la estructura de la fibra como microcurvaturas, así como también las pérdidas procedentes del tendido de la fibra.

A diferencia de la fibra de sílice, la de POF es más difícil de romper o de estropear en su manejo. Esto facilita su tendido sin necesidad de aportarle una mayor resistencia a su revestimiento.

I.4.2 Espectros de atenuación

En la figura 34 se muestra el espectro de atenuación de fibras con núcleo de PMMA de SI y GI. Se tienen ventanas de pérdidas localizadas en 570, 650 y 780 nm entre los máximos de absorción debidos a armónicos de las vibraciones de los enlaces C-H.

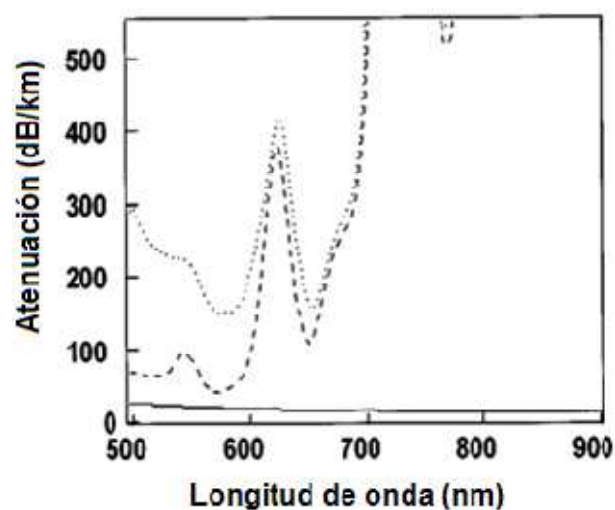


Figura 34: Espectros de atenuación de distintos tipos de PMMA-POF: SI, GI, PF

La POF de salto de índice (SI POF) muestra que la mejor ventana está situada en torno a los 570 nm, con una atenuación por debajo de 0.1 dB/m. Sin embargo, los diodos LED más eficientes y baratos se fabrican en la región del rojo (650 a 660 nm) a estas longitudes de onda se tiene una atenuación del orden de 0.15 dB/m, encontrándose el límite teórico en 0.106 dB/m. La POF de índice gradual (GI POF) también posee una transmisión satisfactoria con unas pérdidas de 0.16 dB/m a 650 nm. El pequeño incremento en la región de longitudes de onda bajas del espectro de atenuación en la GI POF se relaciona con el dopante utilizado para formar el perfil gradual. Cabe destacar que la atenuación depende enormemente de la apertura numérica de la luz inyectada. Los valores citados, referidos a fuentes colimadas monocromáticas pueden aumentar incluso en 0.1 dB/m con luz lambertiana con una anchura espectral de 120 nm.

La figura 34 compara además las pérdidas teóricas de la POF de PMMA con las de la POF perfluorinada (PF POF). Aunque la comercialización de este tipo de fibras es escasa, proporcionan un camino muy prometedor para una mejora significativa de las características de la POF.

I.5 Dispersión y Ancho de Banda

La capacidad de la fibra óptica plástica para transmitir elevadas tasas de datos es una de las características que la pueden hacer especialmente valiosa a la hora de ser utilizada en redes LAN. Para nosotros tiene especial trascendencia, ya que deseamos enviar una tasa de 125 Mbps (Fast Ethernet) en un caso y de 1.25 Gbps (Gigabit Ethernet) en otro. Por lo tanto, es importante conocer los mecanismos físicos que limitan el ancho de banda de la POF: la dispersión temporal.

La velocidad de transmisión viene limitada por la dispersión temporal que está causada por las características dispersivas de la fibra sobre la señal en el transcurso de la distancia, lo que provoca ensanchamiento de los impulsos a medida que se propagan en su recorrido y, en consecuencia, deformación de los mismos, acarreando errores que, en definitiva, provocan fallos en recepción, lo que termina por imposibilitar la comunicación. Existen fundamentalmente dos tipos de dispersión que afectan a la POF y forman la dispersión temporal: la *dispersión material* y la *dispersión intermodal*, propias de las fibras multimodo.

- *Dispersión material:* 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, ya que su anchura espectral no es nula. De este modo, como a cada longitud de onda le corresponde una velocidad de propagación, tendremos dentro de cada modo una velocidad distinta para cada longitud de onda transmitida, originándose este tipo de dispersión.
- *Dispersión intermodal:* 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 pero con direcciones distintas llegarán en instantes diferentes al extremo receptor.

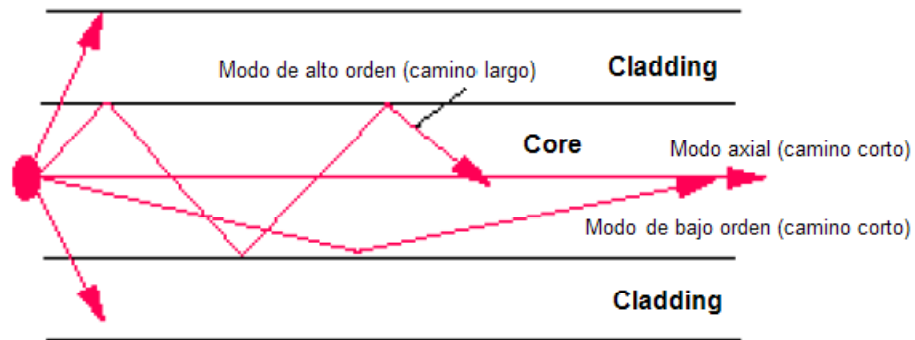


Figura 35: Diferencia de caminos entre rayos en SI-POF

En la figura 35 se observan las diferentes direcciones que pueden tomar las ondas según el ángulo con el que incidan sobre el cladding. Sin embargo, para eliminar la limitación procedente de la dispersión intermodal, se propone la fabricación de POF con núcleo de índice gradual. Con el que se equilibran las velocidades de propagación de los diferentes modos (figura 36) y se alcanzan tasas de Gbps en las mismas distancias, proporcionando más posibilidades de aplicación.

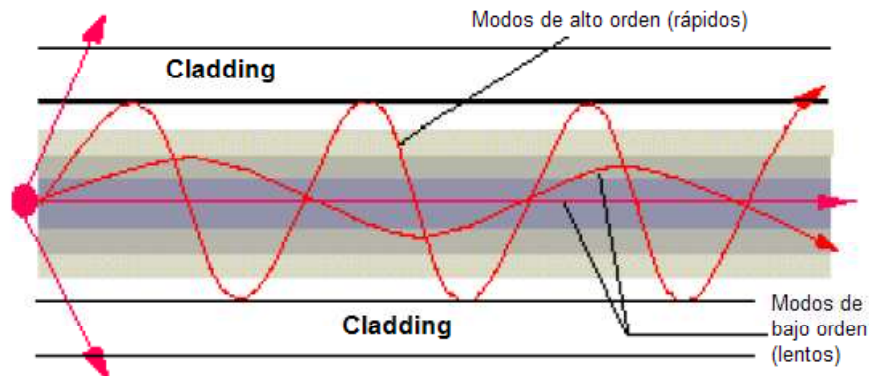


Figura 36: Diferencia de caminos entre rayos en GI-POF

I.6 Ancho de banda

Es posible definir el término ancho de banda de distintas formas. Esencialmente, describe el rango de frecuencias de un sistema para el que la transmisión de señales puede ser hecha con una atenuación razonable. En sistemas POF, el factor limitador del ancho de banda es precisamente él mismo, creado por la dispersión modal. La SI-POF se puede describir como un filtro gaussiano paso bajo. Nosotros usaremos la siguiente definición (figura 37) de ancho de banda:

f_{3dB} : Frecuencia a la cual la amplitud de una señal sinusoidal modulada monocromáticamente es reducida a $\frac{1}{2}$ del nivel óptico.

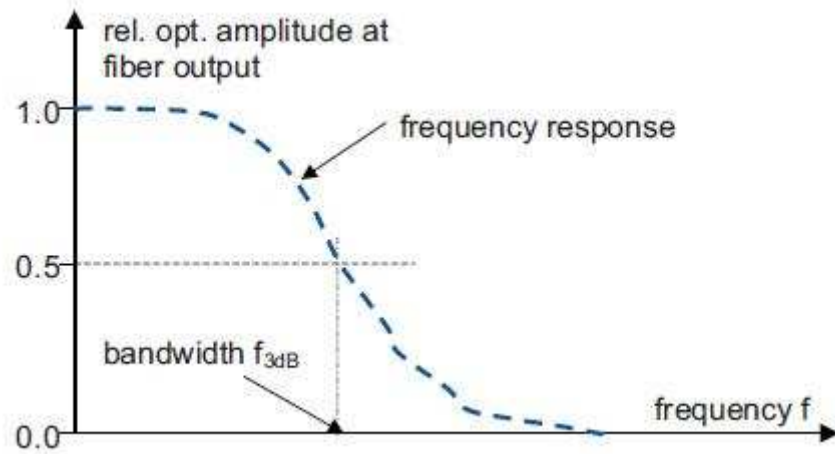


Figura 37: Definición de ancho de banda

Anexo II: MODELO MATRICIAL DE PROPAGACIÓN

El modelo de propagación utilizado se basa en la ecuación de flujo de Gloge (11) que describe la evolución de la distribución de potencia modal cuando es transmitida por una POF y en la que los diferentes modos están caracterizados por su ángulo de propagación respecto al eje de la fibra, θ , considerado como una variable continua. Esto es válido para POFs de salto de índice y de gran apertura numérica, donde debido al elevado número de modos que se propagan, éstos se pueden considerar como un continuo. En la generalización propuesta en (5), la difusión y la atenuación se describen como funciones del ángulo de propagación y son características para cada tipo de fibra. De esta forma, la expresión de la ecuación es la siguiente:

$$\frac{\partial P(\theta, z)}{\partial z} = -\alpha(\theta)P(\theta, z) + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \cdot d(\theta) \frac{\partial P(\theta, z)}{\partial \theta} \right), \quad [\text{II.1}]$$

Donde $P(\theta, z)$ describe la distribución de potencia óptica en función de θ y de la longitud de fibra, z , mientras que $\alpha(\theta)$ y $d(\theta)$ son las funciones angulares de atenuación y difusión características para cada tipo de fibra.

Con este modelo, se pueden predecir los patrones de campos lejanos obtenidos con distintas condiciones de inyección. De hecho, las funciones de atenuación y difusión angulares se obtuvieron mediante un proceso de ajuste, utilizando medidas experimentales de perfiles radiales en función de la longitud de fibra. Estos perfiles se extrajeron de imágenes de patrones de campo lejano, FFP, para distintas fibras, partiendo de longitudes largas. Sin embargo, este modelo no incluye la variable temporal y no puede aplicarse en la predicción de anchos de banda de la fibra.

Partiendo de la generalización de Gloge para incluir el tiempo en la ecuación [II.1], es posible obtener respuestas al impulso y respuestas en frecuencia. Además de la distribución de potencia, $P(\theta, z, t)$, la distancia de propagación, z , también es función del tiempo, con lo que la ecuación [II.1] se transforma en:

$$\frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial z} = -\alpha(\theta)P(\theta, z, t) - \frac{n}{c \cos \theta} \cdot \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \cdot d(\theta) \frac{\partial P(\theta, z, t)}{\partial \theta} \right), \quad [\text{II.2}]$$

A partir de la cual, aplicando la transformada de Fourier a ambos lados de la misma y utilizando la propiedad de la derivada de Fourier se obtiene la siguiente ecuación simplificada:

$$\frac{\partial p(\theta, z, \omega)}{\partial z} = -\left(\alpha(\theta) + \frac{n}{c \cos \theta} \cdot j\omega \right) p(\theta, z, \omega) + \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\theta \cdot d(\theta) \frac{\partial p(\theta, z, \omega)}{\partial \theta} \right), \quad [\text{II.3}]$$

Donde $p(\theta, z, \omega)$ es la transformada de Fourier de $P(\theta, z, t)$. Para resolver esta ecuación se implementa un método de diferencias finitas donde se utiliza una diferencia progresiva para la primera derivada en z , y una diferencia central de primer y segundo orden para las derivadas angulares primera y segunda, respectivamente. Por lo tanto la potencia en el ángulo θ y distancia ($z + \Delta z$) se obtiene como la combinación lineal de la potencia en el mismo ángulo y

los dos ángulos adyacentes $(\theta + \Delta\theta, \theta - \Delta\theta)$ para una distancia z como muestra la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 p(\theta, z + \Delta z, \omega) = & \left(1 - \left(\alpha(\theta) + \frac{n}{c \cos \theta} \cdot j\omega\right) \Delta z\right) p(\theta, z, \omega) \\
 & + \frac{\Delta z}{2 \cdot \Delta\theta} \left(\frac{d(\theta)}{\theta} + d'(\theta)\right) (p(\theta + \Delta\theta, z, \omega) - p(\theta - \Delta\theta, z, \omega)) \\
 & - \frac{2d(\theta)\Delta z}{\Delta\theta^2} p(\theta, z, \omega) \\
 & + \frac{d(\theta)\Delta z}{\Delta\theta^2} (p(\theta + \Delta\theta, z, \omega) - p(\theta - \Delta\theta, z, \omega)).
 \end{aligned} \tag{II.4}$$

Esta ecuación puede expresarse de manera más compacta en forma matricial. De hecho, los cambios diferenciales en la distribución de potencia angular para cada paso Δz están dados por un simple producto de matrices. Esto significa que, dada la potencia angular para una longitud inicial, z_1 , la distribución de potencia para una longitud mayor, z_2 , puede ser calculada con la siguiente ecuación matricial:

$$\mathbf{p}(z_2, \omega) = (\mathbf{A}(\omega) + \mathbf{D})^m \cdot \mathbf{p}(z_1, \omega), \tag{II.5}$$

En la ecuación anterior, $\mathbf{p}(z_1, \omega)$ y $\mathbf{p}(z_2, \omega)$ son vectores columna que describen la distribución angular de potencia en el dominio frecuencial para dos longitudes de fibra cuya diferencia es m veces la longitud básica. Los vectores de potencia se definen de forma que cada componente k del vector es la potencia en el ángulo de propagación discretizado $\theta = k \cdot \Delta\theta$, pero además teniendo la dimensión adicional de la frecuencia. Escogiendo una longitud básica Δz suficientemente pequeña, el valor del entero m se puede obtener para cualquier par de longitudes, $z_2 > z_1$ como $m = \frac{z_2 - z_1}{\Delta z}$.

\mathbf{A} es una matriz diagonal que describe la potencia de propagación sin difusión cuyos elementos vienen dados por la siguiente ecuación:

$$A_{k,k}(\omega) \approx 1 - \Delta z \cdot \alpha(k \cdot \Delta\theta) - \Delta z \cdot \frac{n}{c \cos(k \cdot \Delta\theta)} \cdot j\omega, \tag{II.6}$$

que es la aproximación de primer orden de:

$$A_{k,k}(\omega) = \exp(-\Delta z \cdot \alpha(k \cdot \Delta\theta) - \Delta z \cdot \frac{n}{c \cos(k \cdot \Delta\theta)} \cdot j\omega) \tag{II.7}$$

\mathbf{A} es el único término dependiente de la frecuencia en la ecuación [II.5]. Los valores de $A_{k,k}(\omega)$ se obtienen muestreando la frecuencia angular ω con la precisión requerida para poder calcular la transformada de Fourier inversa de $\mathbf{p}(\theta, z, \omega)$ que será $\mathbf{P}(\theta, z, t)$. La matriz \mathbf{D} es una matriz tridiagonal que describe la difusión de potencia a lo largo de la fibra. Sus elementos para $k > 0$ son:

$$\begin{aligned}
 D_{k,k-1} &= \left(d(k \cdot \Delta\theta) - \frac{1}{2} \frac{d(k \cdot \Delta\theta)}{k} - \frac{1}{2} d'(k \cdot \Delta\theta) \Delta\theta\right) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \\
 D_{k,k} &= -2d(k \cdot \Delta\theta) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2}, \\
 D_{k,k+1} &= \left(d(k \cdot \Delta\theta) + \frac{1}{2} \frac{d(k \cdot \Delta\theta)}{k} + \frac{1}{2} d'(k \cdot \Delta\theta) \Delta\theta\right) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2}
 \end{aligned} \tag{II.8}$$

Las matrices \mathbf{A} y \mathbf{D} se calculan para cada tipo de fibra a partir de las funciones $\alpha(\theta)$ y $d(\theta)$ que fueron previamente determinadas para las fibras que se van a analizar en este proyecto.

La matriz $(\mathbf{A}(\omega) + \mathbf{D})$ lleva toda la información espacio-temporal correspondiente a la potencia de propagación a través de la fibra y por consiguiente da una descripción completa de la fibra como sistema de transmisión. La clave del método matricial utilizado para resolver la ecuación [II.2] es que sólo un pequeño porcentaje de los elementos de esta matriz son distintos de cero, matriz *sparse*, lo que hace más eficiente el cálculo de sus potencias múltiples, que ejecutar el mismo número de iteraciones, especialmente en el caso de utilizar MatLab™. Además, no es necesario recalculan estas matrices cuando se cambian las condiciones iniciales para obtener las distribuciones de potencia de salida espacio-temporales, ya que solo dependen de la atenuación y difusión de la fibra. Los valores de Δz y $\Delta \theta$, que son críticos para la convergencia, se han determinado de acuerdo con la precisión requerida. Para los presentes cálculos se ha utilizado $\Delta z = 0.001$ m y $\Delta \theta = 0.005$ rad obteniendo resultados bastante precisos.

Una vez que la condición inicial, dada por la distribución de potencia inyectada en la fibra puesta en forma vectorial, se multiplica por la correspondiente matriz característica de la misma, se obtiene la distribución de potencia, $p(\theta, z, \omega)$, como función del ángulo de salida, de la frecuencia y de la longitud, para una determinada fuente de entrada.

A partir de $p(\theta, z, \omega)$ para una serie de valores de z se pueden obtener todos los parámetros relevantes como se va a ver. En primer lugar la respuesta frecuencial en función de la longitud $H(L, \omega)$ se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$H(L, \omega) = \int_0^{\pi/2} \sin(\theta) p(\theta, L, \omega) d\theta. \quad [\text{II.9}]$$

Así mismo el cálculo de la transformada de Fourier inversa de $p(\theta, L, \omega)$ permite obtener el ensanchamiento temporal de un pulso para cada ángulo de salida a una determinada longitud, $P(\theta, L, t)$ que se denominará a partir de ahora, distribución de potencia espacio-temporal y a partir de la cual se pueden obtener la respuesta al impulso de la fibra y el perfil radial de su patrón de campo lejano.

En la gráfica del centro de la figura 38 está representada la imagen de la distribución de potencia espacio-temporal para una fibra PGU de 150 metros. El tiempo se muestra en el eje horizontal en nanosegundos y el ángulo de salida en grados en el eje vertical. Cada fila representa el pulso temporal que llega a un determinado ángulo de salida. En la gráfica de la izquierda se muestra la respuesta al impulso para dicha longitud de fibra normalizado que se ha obtenido como la integral de potencia sobre el ángulo de salida de la siguiente forma:

$$P(L, t) = \int_0^{\pi/2} \sin(\theta) \cdot P(\theta, L, t) d\theta, \quad [\text{II.10}]$$

y cuya transformada de Fourier, como ya se ha comentado, es $H(L, \omega)$. Cada columna de la imagen representa el perfil radial de la distribución espacial de potencia para un tiempo fijo. La gráfica de la derecha muestra el perfil radial del FFP obtenido como la integral de potencia sobre el tiempo calculada mediante la siguiente expresión:

$$P(\theta, L) = \int_0^{Ln/c} P(\theta, L, t) dt, \quad [\text{II.11}]$$

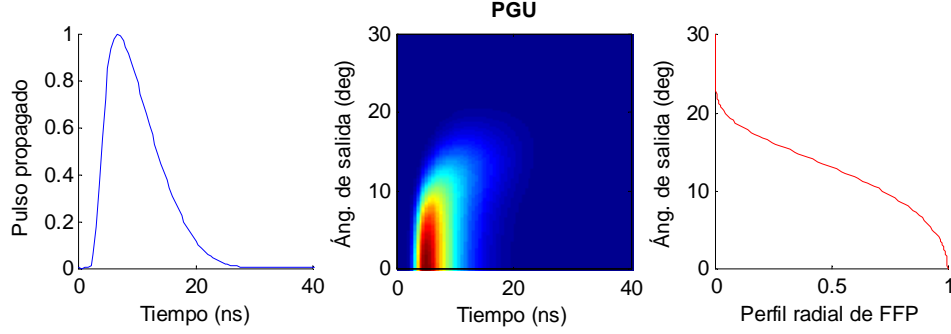


Figura 38: Representación en imagen de la distribución de potencia espacio-temporal a la salida de una fibra PGU de 150 m y las integrales de potencia para el ángulo de salida y para el tiempo

Un aspecto importante que se deriva de la triple dependencia de la potencia con el ángulo de propagación, la longitud y la dimensión tiempo/frecuencia es que para obtener el ensanchamiento del pulso o la respuesta en frecuencia para una longitud dada, $z = L$, no es suficiente conocer la respuesta al impulso o la respuesta frecuencial para una longitud menor, sino que se requiere conocer toda la trayectoria seguida por la potencia que llega a ese ángulo. Esto implica que es necesario conocer la distribución de potencia espacio-temporal $p(\theta, L_o < L, t)$. Por lo tanto, para calcular la respuesta frecuencial en cualquier longitud es necesario conocer la distribución angular de potencia justo a la entrada de la fibra: $P(\theta, z = 0, t = 0)$ donde no hay temporal inducido por propagación. De hecho, en trabajos previos se sugiere que la distribución de entrada tiene un fuerte impacto en el ancho de banda cambiando el equilibrio de difusión y atenuación diferencial (12). Por lo tanto la distribución inicial de potencia angular es crítica para predecir el comportamiento temporal. La fuerte difusión inicial sufrida por la potencia óptica cuando entra en la fibra es introducida en el modelo como un efecto independiente por medio de otra matriz, la matriz de inyección J , que es muy diferente para cada tipo de fibra y se ha estimado a partir de perfiles radiales experimentales para fibras cortas (8)(12). El producto de la matriz de inyección y la distribución de potencia angular del emisor proporciona el vector de distribución de potencia angular justo al entrar a la fibra:

$$p(z = 0_+) = J \cdot p(z = 0_-) \quad [\text{II.12}]$$

Anexo III: SOFTWARE UTILIZADO

III.1 LabView™

El entorno de programación Labview™ ha sido una herramienta fundamental de este proyecto. Se ha usado para la adquisición de datos del montaje experimental. Esos datos son los que han servido como base para realizar todos los modelos y aproximaciones del trabajo.

En la siguiente figura se muestra la captura de pantalla del Front Panel de Labview™.

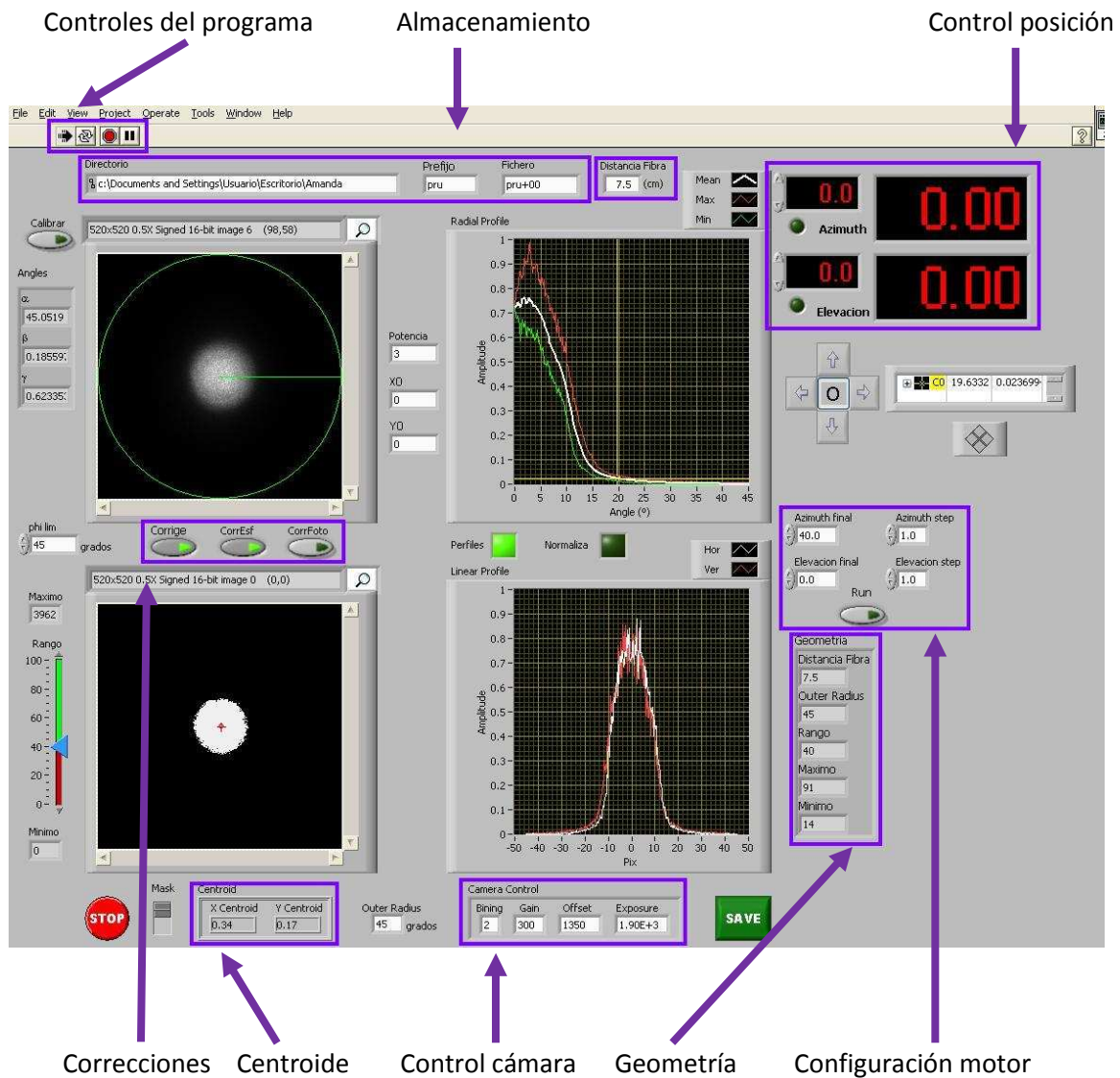


Figura 39: Captura del programa LabView™

En la parte superior izquierda de la misma observamos la imagen captada por la cámara QICAM FAST para un ángulo de 0°. En la parte inferior izquierda vemos esa misma imagen umbralizada. En la zona superior derecha observamos los perfiles radiales máximo, promedio y mínimo (rojo, blanco y verde respectivamente) En la parte inferior derecha se ve el mismo perfil simetrizado.

En cuanto a los controles señalados en la figura tenemos:

- Controles de programa: usados para iniciar y parar el barrido.
- Almacenamiento: *Directorio* indica el lugar donde las medidas son guardadas. *Prefijo* muestra el nombre raíz del conjunto de medidas. *Fichero* describe el nombre de cada uno de los ficheros guardados en cada medida, tres por cada medida del barrido.
- Distancia Fibra: permite especificar la distancia a la que el extremo de la fibra se encuentra de la pantalla, dato necesario para realizar la escala de ángulos.
- Control de posición: es una de las partes más manejadas del programa, ya que con ella hacemos tanto el alineamiento de la fibra con el haz del láser al comienzo de los barridos, como la fijación del cero. Existen dos partes diferenciadas en esta zona. El marcador superior, *Azimuth*, marca la posición en la que actualmente se encuentra el soporte de la base rotatoria y, por lo tanto, la posición de la fibra respecto al láser, y *Elevación*, que puede ser usado para desplazar dicho soporte de manera vertical, aunque en nuestro caso no ha sido utilizado.
- Configuración del motor: *Azimuth Final* marca la última posición angular a la que el soporte rotatorio va a llegar. *AzimuthStep* marca el paso con el que se hace el barrido. En nuestro caso, ha sido movido cada grado. De la misma forma se usan *Elevación Final* y *Elevación Step*.
- Geometría: muestra diversos datos de la geometría como la distancia a la fibra especificada o el radio máximo que abarca el promediado.
- Centroide: sirve de punto central para el cálculo del perfil radial. Muestra las coordenadas X e Y del centroide calculado a partir del promedio de todos los puntos de luz registrados, superiores a un cierto rango especificado. Junto con el Control de Posición es una de las partes más usadas del entorno. El ajuste del centroide al (0,0) se hace manualmente.
- Correcciones: permite seleccionar, entre otras, las correcciones requeridas por la proyección de una superficie esférica sobre un plano.
- Control de cámara: se especifican parámetros de la cámara QICAM tales como la ganancia, el tiempo de exposición y el offset.

III.2 Matlab™

El entorno de programación MatLab™ ha sido la herramienta fundamental en este PFC para trabajar tanto con simulaciones como con los datos experimentales recogidos. A continuación se enumeran los programas utilizados según su función.

III.2.1 Procesado de los datos experimentales de perfiles radiales

- process.m: es el programa mediante el cual se leen los datos de las imágenes del FFP de cada fibra registrados por el ordenador y los almacena en matrices.

III.2.2 Modelo de propagación

- Difusion.m: calcula la difusión, modelada como una bisigmoide, a partir de sus cuatro parámetros descritos en la ecuación [3.3].
- MPrimig: calcula la matriz tridiagonal básica utilizando los parámetros característicos calculados previamente, atenuación y difusión.

III.2.3 Caracterización de fibras cortas

- F_Fibra4.m: calcula las matrices básicas de las fibras. Las matrices de 50 cm generadas con este programa son las usadas en Verify4B.
- Verify4B: compara medidas con simulaciones de barridos con y sin conector para validar el modelo de propagación para fibra Boeing y el de conector ST.

III.2.4 Obtención de los parámetros característicos del conector

- calculoatenuacion.m: calcula la atenuación producida para cada par de medidas haciendo el cociente entre las columnas de la matriz sin conector y las columnas de la matriz con conector.
- calculodifusion.m: calcula la difusión, minimizando una función de coste, usando el valor de atenuación obtenida en el programa anterior. Utiliza los programas Difusion.m, MPrimig.m, err.m.
- err.m: se calculan los parámetros de la difusión intentando minimizar la función de coste de este programa.

III.2.5 Cálculo de la potencia y el ancho de banda

Estos programas se han desarrollado en el grupo para su uso por las personas de CUNY y ser posteriormente integrados en un software comercial:

- VerifyFB.m: cargando en el programa las medidas realizadas experimentalmente en el laboratorio, se calcula la potencia obtenida para cada longitud.
- verifyBW.m: partiendo igualmente de las medidas realizadas en el laboratorio, se calcula el ancho de banda para cada una de las longitudes, medidas a partir de la respuesta en frecuencia. Utiliza Emitter.m, SIPOF.m, Receiver.m, BW.m, connector.m.
- Emitter.m: genera la matriz P, distribución espacial F(X) y frecuencial F(F).
- SIPOF.m: carga el modelo de fibra estudiado: EAA, PGU, GH.
- Receiver.m: similar a la del emisor, solo que multiplica la potencia de entrada por la respuesta espacial y por la respuesta de frecuencia.
- BW.m: calcula el ancho de banda a partir de la medida de respuesta en frecuencia.
- connector.m: carga el modelo de conector, del tipo='ST' en nuestro caso.
- sources.m: programa que calcula la atenuación, ancho de banda y producto BW·L para cada anchura de fuente estudiada. Utiliza gauss.m, Emitter.m, SIPOF.m, BW.m.
- gauss.m: como ejemplo, gauss(x,FWHM,A,x0) genera una distribución gaussiana de anchura FWHM y amplitud A centrada en (x son ángulos externos en grados)

Anexo IV: INSTRUMENTOS, FIBRAS Y CONECTORES

En este anexo se exponen las hojas de características de dos de las fibras empleadas, de los conectores VL y ST y las de los principales instrumentos utilizados en el sistema de medidas.

- Cámara QICAM FAST 1394
- Fibra Eska Mitsubishi, GH-4001
- Fibra Toray, PGU-FB1000
- Conector VL
- Conector ST

IV.1 Cámara QICAM FAST 1394





HIGH PERFORMANCE DIGITAL IMAGING
made easy

QICAM *FAST1394*

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, low-noise 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.








Note: Lenses are shown for illustration only and are not included.

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

CAMERA OPTIONS

- **RGB Color Filter** for monochrome cameras (F-mount interface required), refer to spec sheet for more details
- **Extended Warranty**



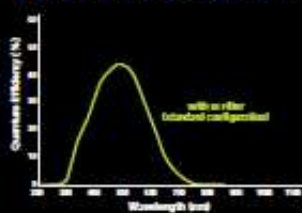


QICAM FAST1394 SPECIFICATIONS

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

SPECTRAL RESPONSE



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® & Mac OS**
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 Output
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	7W (non-cooled); 13W (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)

**Refer to QImaging website for detailed listing of supported operating systems.
Note: Specifications are nominal and subject to change.



Tel 604.708.5061 • Fax 604.539.1825 • info@qimaging.com
www.qimaging.com

Partner to AmScope™

Microimaging Applications Group



Apple and Mac OS are trademarks of Apple Computer, Inc., registered in the U.S. and other countries. Sony is a registered trademark of Sony Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Other brand and product names are the trademarks or registered trademarks of their respective owners and manufacturers.

IV.2 Mitsubishi, GH-4001

ESKA™ High-performance Plastic Optical Fiber: **GK-40**

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

May, 2001

Structure		Packaging	
Core Material	Polymethyl-Methacrylate Resin (PMMA)	Spool Length (m)	5,250
Cladding Material	Fluorinated Polymer	N weight on spool (kg)	6.6
Core Refractive Index	1.49	Spool Weight (kg)	1.4
Numerical Aperture	0.5	Carton Size	315 X 315 X 215
Refractive Index Profile	(Step Index)	Carton G Weight (kg)	8.0
Attenuation (db/m)	0.15	Fiber Code	GK40
Approximate Weight (g/m)	1.0	Cable Code	GH4001/4002
	Unit	Applications: Sensing	
	Typical	GK grade fibers are typically used for sensing temperatures, speed, liquidity levels and positioning. In addition, medical applications are popular, as are applications where tight bends are required.	
Core Diameter	μm		
Overall Diameter	μm		
Fiber Diameter Tolerance	+/- 6%		

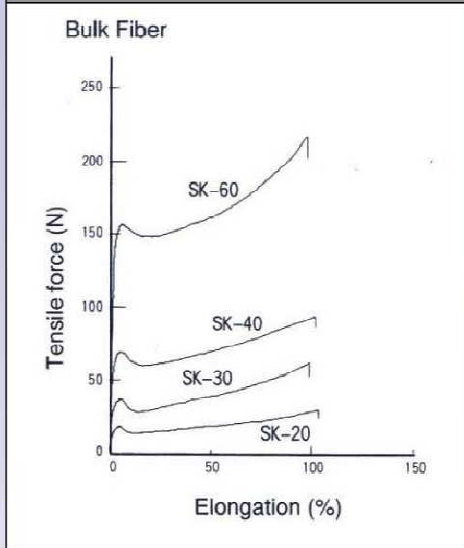
Performance		Criteria for Acceptance and/or Test Conditions	Unit	Values
Temperature Range		No deterioration in optical properties *	°C	-55 — 85
Operating Temperature Under Conditions of High Humidity		No deterioration in optical properties [95% RH] **	°C	=<75
Optical Properties	Transmission Loss	650nm collimated light (standard conditions) [10m — 1m cutback]	dB/km	=<150
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss increment =< 0.5dB [Quarter bend]	mm	=>20
	Tensile Strength	Tensile force at yield point [JIS C 6861]	N	=>65

Notes: Performance tested in conditions cooler than 25°C unless otherwise indicated
 * Attenuation change <10% after 1000 hours
 ** Attenuation change <10% after 1000 hours, except when due to absorbed water

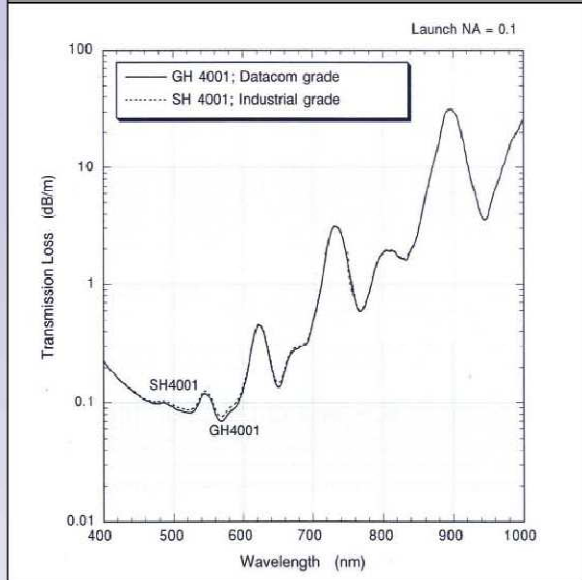
ESKA™ Plastic Fiber Optic & Cable General Technical Information

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

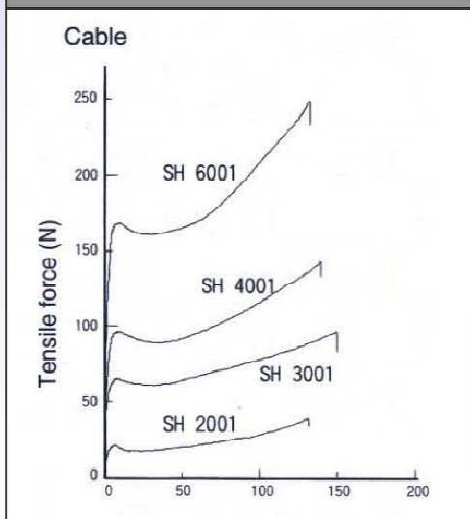
Tensile Characteristics: Bulk Fiber



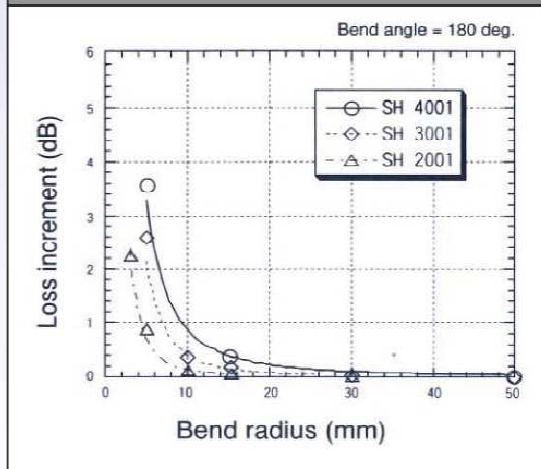
Typical Transmission Loss Spectrum Launch NA=0.1



Tensile Characteristics: Cable



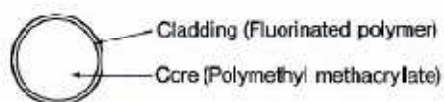
Bending Loss



IV.3 Toray, PGU-FB1000

KIND OF SERIES		Communication and Industrial use				
		PG Series				
Material	Core Cladding	Polymethyl methacrylate Fluorinated Polymer				
Diameter	Fiber	3.0~0.25mm				
Structure		Step Index Type				
Numerical aperture (N.A.)		0.5				
Acceptance Angle degree		60				
Attenuation*	Fiber Diameter	3.0, 2.0mm	1.5mm	1.0, 0.75mm	0.5mm	0.265, 0.25mm
	Ultra grade		under 0.15	under 0.15	under 0.18	
	Supra grade					under 0.30
dB/m at 650nm	Regular grade	Under 0.30	under 0.20	under 0.20	under 0.25	under 0.35
Allowable Bending Radius		>20mm		>9mm		
Available temperature range						
Permanent use		-40° C ~ 70° C				
Main usages		Data transmission				
		Light Guide				
		Optical Sensor				
		Electric Appliances				
		Displays				

*By Toray testing method

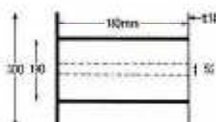


POLYMER OPTICAL FIBER

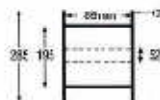
Grade	Product Code		Attenuation dB/m 650nm	Fiber Diameter (mm)	Fiber Length On Spool (m)	Spool Type
	PF Series	PG Series				
Ultra	PFU-FD1000	PGU-FB1500	~0.15	1.5	700	B
	PFU-FB1000	PGU-FB1000	~0.15	1.0	1500	D
	PFU-FB1000	PGU-FB1000	~0.15	1.0	5250	A
	PFU-FB750	PGU-FB750	~0.15	0.75	2700	B
	PFU-FB500	PGU-FB500	~0.18	0.5	6000	B
Supra		PGS-FB265	~0.30	0.265	12000	B
		PGS-FB250	~0.30	0.250	12000	B
Regular		PGR-FB3000	~0.20	3.0	150	B
		PGR-FB2000	~0.20	2.0	350	D
		PGR-FB1500	~0.20	1.5	700	B
		PGR-FB1000	~0.20	1.0	1500	B
		PGR-FB1000	~0.20	1.0	5250	A
		PGR-FB750	~0.20	0.75	2700	B
		PGR-FB750	~0.20	0.75	9000	A
		PGR-FB500	~0.25	0.5	6000	B
		PGR-FB250	~0.30	0.250	12000	B



Spool Type A



Spool Type B



IV.4 Conector VL

VL/VL Industrial POF Fiber Patch Cords

Latching connectors, 1.0 mm core, UL-rated 2.2 mm jacket - GHCP4001



Industrial Fiber Optics manufactures standard product lines of fiber optic patch cords with plastic optical fiber (POF) and Versatile Link (VersaLink) terminations. These products provide ready-made solutions for quick installations in commercial or industrial networking/communications applications using Avago VersaLink fiber optic transmitters and receivers. Our premier quality patch cords are available in simplex and duplex cable with latching and non-latching connectors, heavy-duty or UL-rated cable construction and in many standard lengths.

This patch cord line utilizes high-quality ESKA® Premier GHCP4001 fiber cable featuring a rugged polyethylene jacket. Patch cord terminations are authentic Avago VersaLink connectors.

These cables either meet or exceed the technical specifications of patch cords made by Avago or other contract manufacturers.

Features

- ◆ Simplex, duplex, latching and non-latching connector options
- ◆ UL-rated fiber cable and connections
- ◆ Crimped and epoxied connector terminations for maximum retention strength
- ◆ 1 μ m polish terminations ensure high optical coupling efficiency
- ◆ Assembly processes exceed Avago recommended procedures

IV.5 Conector ST

© COPYRIGHT 2009 BY INDUSTRIAL FIBER OPTICS, INC.
ALL RIGHTS RESERVED.

22 [.87]

STRIP LENGTH: 22mm

NOTES:

1. ROHS COMPLIANT
2. -40°C TO 80°C OPERATING TEMPERATURE
3. SUITABLE FOR POF WITH Ø2.2mm JACKET AND Ø1.0mm OPTICAL CORE
4. NICKEL PLATED ALUMINUM BOOT WITH STAINLESS STEEL FERRULE
5. TIA 804.2 (FOCUS 2)

INSTRUCTIONS:

1. STRIP A 22mm LENGTH OF JACKET OFF OF FIBER.
2. SLIP BOOT OVER CABLE.
3. APPLY EPOXY TO INSIDE OF ST CONNECTOR AND BARE FIBER.
4. INSERT END OF CABLE INTO ST CONNECTOR. ROTATE FIBER DURING INSERTION TO EVENLY DISTRIBUTE EPOXY.
5. CRIMP FERRULE HOLDER TO CABLE AND SLIP BOOT OVER FERRULE. ALLOW EPOXY TO CURE BEFORE POLISHING.

REV	DESCRIPTION	EDD	DATE	DMN	APPD
-	INITIAL RELEASE		10/21/09	BB	AR

OPTIONAL SHORT BOOT

CRIMP TOOL: IF 370046 USE 2.5mm [.10 IN.] HEX CRIMP

RECOMMENDED EPOXY:
EPO-TEK 301

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS MILLIMETERS [IN.]

TOLERANCES	SURFACE
Ø P.D.: ±1	TEXTURE: 2/
1 P.D.: ±.25	
2 P.D.: ±.127	
3 P.D.: ±.025	
4 P.D.: ±.013	
ANGLE: 1/2	

REMOVE BURRS AND SHARP EDGES
FLATNESS .005 MM PER MM
ALL DIMENSIONS AFTER FINISH

DATE	CHECKED BY	DATE	CHECKED BY
10/21/09	BIDWELL	10/28/09	REYES

PRODUCT		MATERIAL	
6061 ALUMINUM		NICKEL PLATED	

PART NUMBER	BOOT
51 0066	SHORT BLACK BOOT
51 0067	STANDARD BLACK BOOT
51 0166	STANDARD YELLOW BOOT
51 0167	STANDARD RED BOOT
51 0168	STANDARD BLUE BOOT
51 0169	STANDARD WHITE BOOT

INDUSTRIAL FIBER OPTICS

TEMPE, AZ 85281

ST CONNECTOR

NAME	SIZE	SCALE	PART NUMBER	REV
A	1:1	51 0067	-	

DO NOT SCALE DRAWING

SHEET 1 OF 1

Anexo V: ARTÍCULO

Effects of connectors in SI-POFs transmission properties studied in a matrix propagation framework

A. Esteban ⁽¹⁾, M. A. Losada ⁽¹⁾, J. Mateo ⁽¹⁾, N. Antoniadis ⁽²⁾, A. López ⁽¹⁾, J. Zubia ⁽³⁾

1: Aragón Institute of Engineering Research (i3A), Universidad de Zaragoza, 50018 Zaragoza, Spain

2: City University of New York, The College of Staten Island, Staten Island, NY 10314, USA

3: University of the Basque Country (UPV/EHU), Alda. Urquijo s/n, E-48013, Bilbao, Spain

Corresponding author: alosada@unizar.es

Abstract: In this manuscript, we present a matrix model for Plastic Optical Fiber connectors estimated from experimental radial profiles extracted from recorded output far field patterns. This matrix can be easily incorporated into a propagation model to predict the impact on transmission properties of connectors inserted in different positions of a POF backbone network.

Key words: Optical power propagation, fiber modeling, diffusion, SI-POF, optical connector.

1. Introduction

Plastic optical fibers (POF) have proven to be a competitive transmission media in short range applications as in-house and automotive networks. These networks are characterized for their large connectivity which is generally provided by using a great number of connectors. There is experimental evidence that connectors change network performance increasing bit error rates and that their effect is different depending on their position relative to transmitter and receiver [1]. Here, our aim is to test different types of connectors and to characterize their spatial effects adapting a method which was successfully applied before to characterize the effects of a corrugated scrambler [2]. The method consists on measuring experimental far field patterns (FFPs) for short fibers scanning the injection angle with a collimated source. The comparison of the measurements with and without the device provides an easy way to model connectors as linear systems using matrices. These matrices can be straightforwardly introduced in a framework based on the propagation matrix to model fiber transmission for different large core POFs [3]. This approach is able to predict both spatial and temporal system transmission properties, is fast and robust and can be integrated into complex network simulation tools to assess different layouts of a network design. Thus, model predictions using connectors in different positions can be calculated and compared to experimental measurements obtained for the same fibers to validate the characterization method.

2. Matrix characterization of connectors

We have characterized the two types of connectors shown in Figure 1: ST and Versalink (VL), using fibers of step-index profile, 1mm diameter core and near 0.5 of numerical aperture. We used three different fibers: a fiber with an extended temperature range that will be called (A) from now on; PGU-FB1000 from Toray (B), and ESKA-PREMIER GH4001 from Mitsubishi (C). In what follows, we describe the matrix model for the connectors based on an approach similar to that used to model power propagation through the fiber [3]. The diffusion and attenuation functions needed to calculate the connector matrix were estimated using experimental measurements of the angular scan of the far field pattern with and without the connectors as will be described later.

2.1. Connector matrix model

In a double-connector, such as those shown in Figure 1, power exits one fiber and enters another. In this process, power at lower angles is subjected to strong injection diffusion, while power at higher angles can

be lost by spatial filtering depending on the fiber-to-fiber distance. We assume that the effects of the connector over the angular power distribution are linear but spatially variant. Thus, the power that exits the connector at a given angle can be expressed as a linear function of the input power at that and other angles, and the connector effects can be modeled as a multiplicative matrix, \mathbf{M}_{cc} . Therefore, given the input power profile as a column vector, p_i , where each vector element is the power at a given angle (θ), the output power vector, p_o , can be obtained by the matrix product of p_i , and by the connector characteristic matrix, given as $p_o = \mathbf{M}_{cc} \cdot p_i$.

In the matrix \mathbf{M}_{cc} , each column describes the power spread for a given input angle due to the connector, where each element in this column gives the relative power transferred to the angle indicated by the row index. If power spread was independent on the input angle, the matrix product would be equivalent to a convolution of a single function by the input power vector. The effects of the connector over the optical power distribution are attenuation and diffusion, which are usually functions of the input angle and thus, the connector, although linear, is, in general, angle-variant. To describe the changes in power imposed by the connectors we have used a similar approach as the one used to describe power propagation through a fiber [3]. In this approach, a propagation matrix describes the power transfer to adjacent angles in an infinitesimal fiber length. This propagation matrix is the sum of a diagonal matrix that accounts for fiber attenuation without diffusion and a tri-diagonal matrix which indicates the power spread to adjacent angles. The propagation matrix elements are calculated from the angular attenuation and diffusion functions, characteristic of the fiber, as specified in the following expression:

$$\begin{aligned} p(\theta, z + \Delta z, \omega) = & \left(1 - \left(\alpha(\theta) + \frac{n}{c \cos \theta} \cdot j\omega \right) \Delta z \right) p(\theta, z, \omega) \\ & + \frac{\Delta z}{2 \cdot \Delta \theta} \left(\frac{d(\theta)}{\theta} + d'(\theta) \right) (p(\theta + \Delta \theta, z, \omega) - p(\theta - \Delta \theta, z, \omega)) \\ & - \frac{2d(\theta)\Delta z}{\Delta \theta^2} p(\theta, z, \omega) \\ & + \frac{d(\theta)\Delta z}{\Delta \theta^2} (p(\theta + \Delta \theta, z, \omega) + p(\theta - \Delta \theta, z, \omega)). \end{aligned} \quad (1)$$

where $d(\theta)$ and $\alpha(\theta)$ are, respectively, the diffusion and attenuation functions of the propagation angle, θ . Notice that, apart from the spatial (angle and length) variables, there is also a frequency dependence that permits to extract not only spatial, but also temporal transmission characteristics. In the fiber, the power at a given angle spreads slowly to neighboring angles. Thus, a relatively long length of fiber is needed to transfer the power to angles further away. This distributed power transfer affects the paths for different angles, introducing temporal delays that change the frequency response of the fiber. In the connector, however, power is instantaneously transferred to angles relatively far from the initial one. This localized strong power coupling is equivalent to that caused by a long fiber, but, being a localized effect it does not introduce temporal delays nor does it directly change the frequency response. However, as the connector imposes large punctual changes to the power distribution that affect the subsequent power evolution, it still has an impact on the system frequency response. Thus, only the spatial part of the propagation matrix for a long fiber is used to model the connector effects. The attenuation function for the connector is directly estimated from the measurements while the diffusion function is obtained fitting the model to the experimental results.

2.2. Experimental procedure

The procedure is based on the measurement of the radial profiles of output FFPs scanning the input angle to have precise information about the angular variation.



Fig. 1: On the left image, two single male ST connectors joined by a female-female connector are shown. On the right image, two male Versalink connectors (VL) joined by a female-female connector of the same type.

These scans are obtained for short fibers, first without the connector and then inserting it near the fiber output end. In this way, the propagation effects are negligible and all the changes in the profiles are produced by the connector. A collimated He-Ne laser beam of 635 nm was directed directly injected into the fiber input end that is placed on the center of a motorized rotary mount to vary the launching angle from -40° to 40° in 1° steps, extracting the radial profile for each recorded FFP. The process to insert the connectors is first to cut both ends and remove the jacket for a length that is different for each connector type: 2 mm for VL and 16 mm for ST. Then, a connector is inserted into each of the two fiber ends which are then joined by a double plug as shown in Figure 1.

In Figure 2, an example of the scans of the radial profile is shown for each of the three tested fibers. The left images show the radial profiles measured for a short fiber without connectors. The middle images show the radial profiles with a VL connector inserted near the output end. The right images show radial profiles with a ST connector. The first row corresponds to fiber A, the second to fiber B and the third to fiber C. This image representation permits to display all the profiles for the same scan in a single plot. In all images, each column represents the radial profile for a given input angle as a function of the output angle on the vertical axis. The mirror images of the profiles, corresponding to negative output angles, are also shown for the sake of symmetry. The profiles for negative input angles have also been measured and their differences reveal the deviation from the ideally symmetric response. The output and the launching angles are given as fiber external angle in degrees.

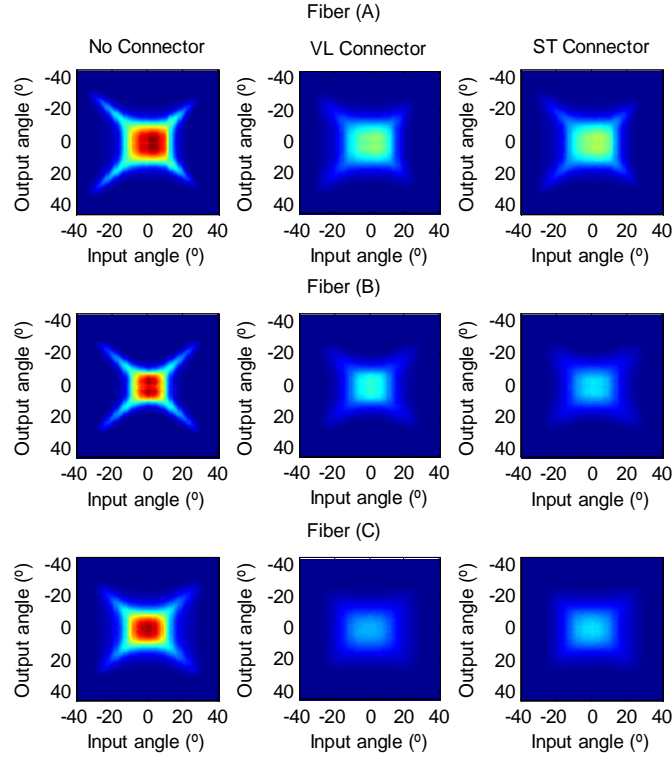


Fig. 2: Leftmost images show the radial profiles measured for a short fiber without connector. Middle images show the radial profiles with VL connector. Rightmost images show radial profiles with ST connector.

The radial profile scans with connectors are wider showing the effects of power diffusion, and darker indicating power loss. The narrow legs clearly visible in the left images obtained without connectors are smoothed out in the middle and rightmost ones. Also, these images reveal differences among fibers. Not only the pattern without connector is initially different for each fiber, but also the effects of the connector over them are not the same. For example, both diffusion and attenuation seem to be larger for fiber C than for the other two fibers. These differences have been corroborated with other measurements which motivates that we will initially look for a different model not only for each connector, but also for each fiber type.

2.3. Connector spatial attenuation and diffusion

Table 1: Diffusion coefficients

Connector	ST			VL		
Fiber	A	B	C	A	B	C
Diffusion Coefficient	0.00031	0.00037	0.00043	0.00031	0.00030	0.00048

Using the matrix properties, the attenuation function can be directly obtained from the pair of scans with and without connector. The sum of all the elements of a matrix column is related to the total power for the corresponding angle. Thus, the ratio of the value of a column sum for the matrix without connector relative to the same column sum for the matrix with connector provides a direct estimate of the attenuation at the angle corresponding to that column. From this ratio, an estimate of the angular attenuation can be directly obtained. At least four pairs of these scans were obtained for each fiber and connector type. Figure 3 shows the attenuation for the three fibers obtained as the average from all measurements. Attenuation in Np/m for the ST connector is shown on the left graph and for the VL connector on the right. The attenuation functions are different both in shape and level for each different fiber type. In general, attenuation is higher for lower angles because the diffusive effects of power injection are stronger for them. The values at the highest angles are not relevant because at those angles there is little power. For both connector types, the same fibers have attenuation functions with a similar shape. We think that behind the origin of the shape are probably both the injection matrix characteristic of the fiber type [4] and the flexibility of the jacket material. The level difference between connector types can be caused by different distances between fiber ends. Notice that fiber A (continuous line) has a smoother attenuation than the other two fibers and also lower values.

The diffusion was obtained to minimize the following cost function, $CF = \text{norm}(\mathbf{P}_{cc} - \mathbf{M}_{cc} \cdot \mathbf{P}_0)$, where \mathbf{P}_{cc} is a matrix that is formed with the radial profiles measured with the connector and arranged as columns, \mathbf{P}_0 is the matrix of the radial profiles measured without connectors, and \mathbf{M}_{cc} is the characteristic matrix for each connector. Our results show that a constant diffusion is able to fit the experimental measurements. In Table 1, the average diffusion parameter is shown for the three fibers and the two connector types. For fiber A, both connectors have the same diffusion coefficient. For the other fibers, the diffusion shows higher differences between connector types. However, as for fibers B and C, the individual measurements showed more dispersion than for fiber A, these differences between connectors may not be relevant.

Once we have the attenuation and diffusion functions, the connector matrix can be obtained as the power of an infinitesimal matrix, \mathbf{M}_0 , calculated using the connector attenuation and diffusion functions with equation (1):

$$\mathbf{M}_{cc} = (\mathbf{M}_{cc,0})^{L/dz} \quad (2)$$

where $L = 10$ m and $dz = 1$ mm. Figure 4 shows as images the average matrices calculated using the attenuation functions given in Figure 3 and the diffusion coefficients in Table 1 for each fiber and connector type. The images have been normalized to the maximum of the six matrices to visualize their differences. The higher row shows the connector matrices for the ST connector and the lower row, for the VL connector. The left images are the connector matrices for fiber A, the middle for B and the right, for fiber C.

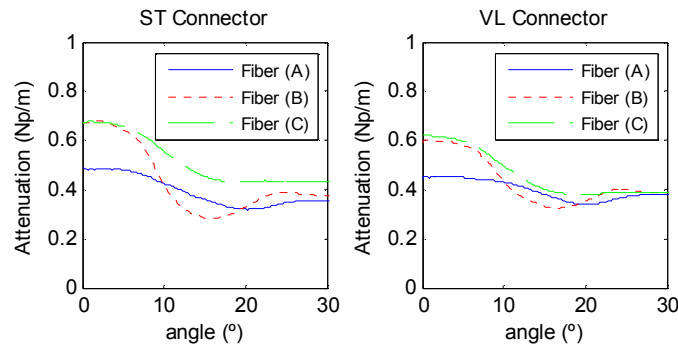


Fig. 3: Attenuation functions for ST on the left graph and VL on the right graph. Attenuation for fiber A is shown as solid lines and with short and long dashes for fibers B and C, respectively.

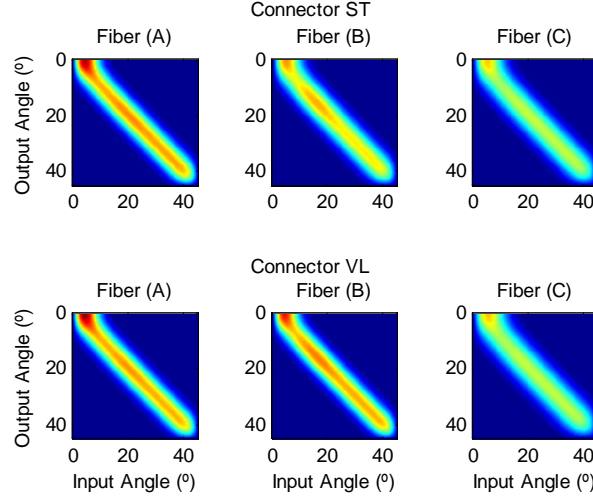


Fig. 4: Connector matrices: Upper row shows matrices for ST connector and lower row for VL connector. On the left, the images corresponding to fiber A, on the middle for fiber B and on the right for fiber C.

3. Results and discussion

3.1. Model validation

In this paragraph, we present the results of a test of the connector matrix model, where experimental measurements of radial profile scans are reproduced introducing the connector characteristic matrix in the framework of the propagation model for each particular fiber [3]. These results are an example of the multiple tests we have performed to validate the model by comparing experimental and simulated parameters. In this case, the radial profiles have been measured inserting the connector at different positions. The fiber segment used was not one of those used to characterize the connectors before. The scan was first obtained for 10 m of fiber A cut in two 5-meter segments that were joined by a double-ST connector (rightmost image of Figure 5). Then, one of the 5-meter segments was withdrawn and the remaining 5-meter segment was also cut in two halves and connectorized (middle image in the upper row). Finally, the 2.5-meter segment was also cut in two halves and the scan for the two 1.25-meter segments joined by a connector measured (leftmost image in the upper row). The images in the lower row show the simulated radial profiles obtained using the propagation matrix characteristic for fiber A and the ST connector matrix for this fiber type. A comparison of both sets of images reveals a good agreement which validates the connector matrix and proves that it can be easily inserted in the propagation model to obtain useful simulations.

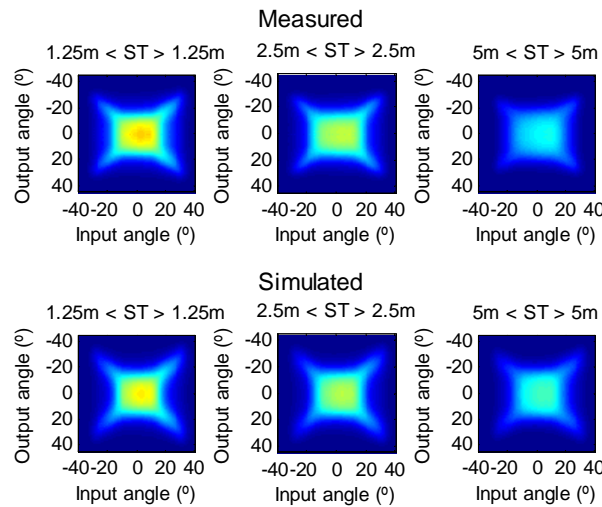


Figure 5: Measured (upper row) and simulated (lower row) radial profiles for fiber A, inserting an ST connector in the middle of 2.5 m (left), 5 m (middle) and 10 m (right).

3.2. Connector Matrix and Insertion Loss

The connector matrices in Figure 4 show substantial differences among fibers. Both types of connector have a similar behavior for fibers A and C, but there are noticeable differences in the case of fiber B. Thus, we conclude that fiber characteristics can have a greater impact on connector quality than the connector design. The explanation of this dependence can be argued as follows: The connector type determines the fiber length that has to be stripped, the pressure of the connector over the fiber and the distance between fiber ends whose impact on the connector quality depends on the fiber characteristics. On the other hand, the fiber has direct influence on the connector quality as the way power enters the fiber is determined by the injection matrix, characteristic of the fiber type. Also, the effect of cutting and stripping is mainly determined by the fiber manufacturing characteristics. For example, the stripping can have a different effect for each fiber type depending on the jacket material.

To have further evidence of these differences among fibers, insertion loss has been measured using a standard POF power meter for short segments of the three fibers and inserting one of the two analyzed connector types. In addition, the fiber ends were prepared using two different razor cutters to evaluate the influence of the finishing process. The results with each cutter have been processed separately and the averages and standard deviations are shown in Table 2. With any of the two cutters, connector losses for a given fiber are similar for ST and VL connectors. Cutter 1 from [5] produces lower insertion losses for all fibers but greater differences between fibers: lowest for A, slightly greater for B and highest for C. With cutter 2 from [6] all fibers exhibit higher but similar losses for all fibers. Moreover with this cutter the variability is larger. We conclude that finishing equipment has a strong impact and that it is necessary to analyze different tools to find the best suited for each fiber type. All the scans in Figure 2 were measured using cutter 1, and thus, the trend followed by the characteristic matrices in Figure 4 is consistent with the insertion losses measured using this cutter. For fiber B, ST and VL connectors have basically the same insertion loss but the characteristic matrices are different in level although not in shape. In any case, these matrices are obtained as an average and represent a mean behavior but we observed great variability in the connector quality for fibers B and, particularly, C.

Table 2: Connector Insertion Loss

	Connector ST		Connector VL	
	Cutter 1	Cutter 2	Cutter 1	Cutter 2
Fiber (A)	1.28 ± 0.20	2.95 ± 0.47	1.23 ± 0.17	2.47 ± 0.70
Fiber (B)	1.45 ± 0.18	2.57 ± 0.39	1.47 ± 0.20	2.30 ± 0.38
Fiber (C)	2.30 ± 0.31	2.63 ± 0.59	2.25 ± 0.37	2.21 ± 0.70

3.3. Connector impact on power loss and bandwidth

Simulations of the effect of connectors in large fiber lengths have been analyzed to quantify the influence that the connector position has over transmission properties in a POF based system as previous findings suggested that connectors have an influence on system performance [1]. Thus, we have used again the characteristics matrices found for connector ST and fiber A to simulate optical power and system bandwidth just before the receiver in a system with a standard POF source with underfilled spatial characteristics. The connector was placed either at 50 cm of the emitter end or at 50 cm of the receiver end, which are not unusual positions for a connector in a POF network. The case without connector has also been obtained for the sake of comparison. Power and bandwidth have been obtained and represented in Figure 6. Connector losses in dB are basically the same for the two conditions and nearly constant with fiber length. The right graph shows that the presence of a connector always lowers the $BW \times L$ product but has a greater effect when it is near the emitter.

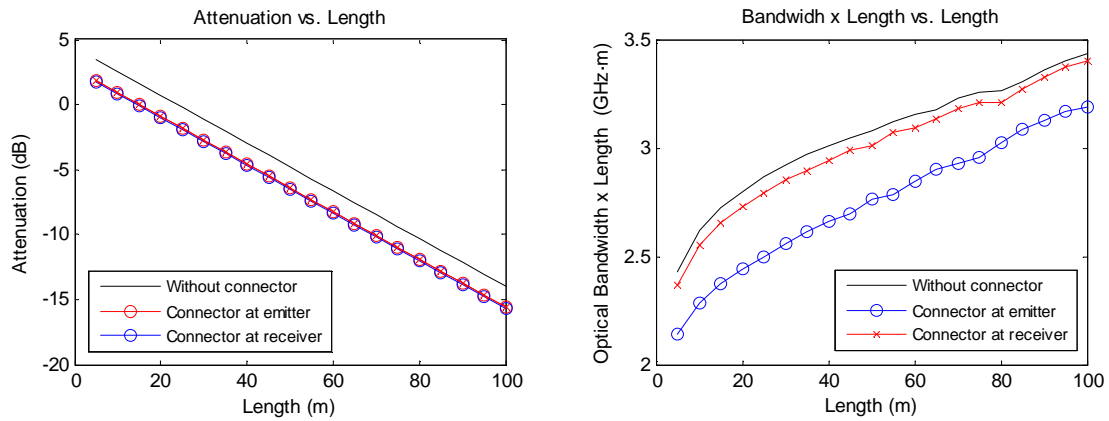


Figure 6: Simulation of attenuation and BL versus length for fiber A inserting a ST connector at 50 cm from the transmitter (red) and at 50 cm from the receiver (blue). Solid black lines show the case without connector.

4. Conclusions

We present a method to model the effects of connectors estimating its characteristic matrices from experimental data. Although the two connector types tested (ST and VL) produced similar results, a different matrix was derived for each fiber type which reveals that fiber characteristics have a strong impact in connector insertion. The choice of adequate finishing tools according to the fiber materials can be an important factor to reduce insertion losses and power spread produced by the connector. Although the combination of all these factors make difficult to define a unique connector model, different performance tests have been done revealing that model simulations are a good approximation to experimental results. Thus, the connector matrix introduced into the propagation model can be useful to predict the impact of connectors on transmission properties of a POF network.

Acknowledgements

This work was supported by the Spanish Ministry for Science and Innovation under grant reference TEC2009-14718-C03-02. We also want to acknowledge T. K. Truong of The Boeing Company for encouragement and useful discussions.

References

- [1] E. Grivas, D. Sivridis, G. Friedrich, "Influence of connectors on the performance of a VCSEL Based standard step-index POF Link", IEEE Photonics Technology Letters, 21, 24, 1888-1890, 2009.
- [2] M.A. Losada, J. Mateo, J.J. Martínez-Muro, "Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation mode", Journal of Optics, 13, 2011 .
- [3] J. Mateo, M.A. Losada, J. Zubia, "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation", Optics Express, 17, 4, 2850-2860, 2009.
- [4] M.A. Losada, J. Mateo and L. Serena, "Analysis of propagation properties of step index plastic optical fibers at non-stationary conditions", in Proceedings of the 16th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application POF, 299-302, 2007.
- [5] Fiber Cutter 1, <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=110>.
- [6] Fiber Cutter 2, <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=120>.

