



**Universidad
Zaragoza**

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN CONECTORES PARA FIBRAS DE PLÁSTICO.

AUTOR:

FRANK ALEJANDRO DOMÍNGUEZ CHAPMAN.

DIRECTOR:

MARÍA ÁNGELES LOSADA BINUÉ.

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES.
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA.

2014

DEDICATORIA.

A Papá y Mamá, por estar cada segundo en mi mente, por ser mis mejores consejeros, confidentes y amigos. Por qué día a día me han guiado a ser mejor, y ciegamente van de mi mano. Por qué allá donde estéis, mi corazón late por los dos, mi mente funciona por el amor que siempre me han dado y mis ojos siguen la luz de vuestros faros. Letras escritas dan fe, de agradecimiento, de amor, pero no bastan, os debo mi vida, os debo lo que soy y lo que seré, por todo ello, gracias con mi vida les doy.

AGRADECIMIENTOS.

Durante toda la carrera he pensado en el día que escriba la dedicatoria a mi trabajo de fin de carrera, y llegado este día aún todo un mar de recuerdos sobre mis años pasado, los queridos, los amados, los golpes y las veces que me he levantado. Por detrás de todas estas letras aquí escritas no solo hay una hoja de papel y montón de tinta, hay tanto sudor, tanto trabajo, tantas lágrimas, tantas risas, tanta diversión, tantas horas y horas sentado delante de un ordenador que se me hacen imposible resumir. Pero nada, los que me conocéis y estáis leyendo estas letras sentirán que se les oprime el corazón o que la memoria alocada aún aloja algún recuerdo loco de Frank, ya sea un buen chiste que acabe con unas risas, o una anécdota curiosa, o incluso una canción tarareada con su baile acompañado, así soy, así me queréis y os quiero. Por todos aquellos que han estado a lo largo de mi vida a mi lado y que como yo, han soñado con verme aquí, mil gracias os quiero mucho, gracias por compartir mi sueño.

Agradecer sería un buen comienzo pero aún quedaría fuera el amor, el cariño, los abrazos, las palmaditas en la espalda, los gritos de ánimo y los besos en la mejilla. Nunca podría estar aquí sin el apoyo de mis padres, lo más querido que puede tener ser humano sobre la tierra y para mí es más que orgullo decirme vuestro hijo. Por todo lo que habéis pasado para poder leer estas letras. Por todo el amor que incondicionalmente me habéis dado y porque estéis donde estéis, siempre ahí al ladito de mi corazón os llevo como un rosario, como mi religión, como mi fe. Sois mi faro en la vida, mi ejemplo y solo os puedo dar gracias porque estoy donde estoy gracias a vos Mamá y Papá. Tata, como te quiero mi niña, gracias por todas las broncas que hemos tenido, lo único que hicieron fue agrandar el amor que te profeso. Siempre velaré por ti, aunque sé que no te hace falta, ahí estaré siempre como tu guardián, noche y día, tú eres mi tata linda y no te cambio por nada en la vida.

A la loca de mi esposa, que yo también estoy loco, pero de amor por ti. Pasos agrandados hemos dado juntos, y pasos aún más largos nos quedarán por dar, pero a tu lado no hay quiniela que parezca grande, ni problema que no tenga solución, igual el ser humano no es perfecto por definición, pero el amor que nos tenemos ha movido mares, tierras y hasta el mismo cielo. Por todo este amor y por lo feliz que somos juntos, muchas gracias por aparecer en mi vida. A mis suegros porque en parte son partícipes de esta historia, muchas gracias por todo el apoyo que me habéis dado, sin vosotros no hubiéramos podido llegar aquí.

A mi hermano porque la vida nos permita volver a estar juntos alguna vez con pipo y mima. Que tu pecho no se sienta solo, aún lejos yo estoy ahí contigo, a pie de camino cada día porque la vida me ha dado un hermano más al que quiero con locura. Gracias por todos los consejos que siempre vinieron de tu cuna, sois y seréis por siempre mi familia.

A María Ángeles y Javier, porque cada día habéis velado de mí como si fuera vuestro hijo más grande. Por todo el cariño y la atención que me han brindado. Por haberme acogido con tanto amor y buena fe, muchas gracias. Por enseñarme a trabajar cada día mejor, por alegrarse con cada victoria y sufrir cada revés, por estar simplemente ahí cuando se necesita y decir esas palabras que mis padres en la distancia no me pueden dedicar. Muchas gracias porque me han enseñado que a la meta se llega con 1% de talento y un 99% de trabajo, imponiendo el sacrificio, la fuerza de voluntad y los deseos de aprender haciendo algo nuevo. Gracias por todo el apoyo y la confianza que siempre me habéis dado.

ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE LOS CONECTORES

PARA FIBRAS DE PLÁSTICO.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio experimental de las pérdidas introducidas por los conectores para fibra de plástico (*Plastic Optical Fibre, POF*) en función de los factores que tienen influencia sobre dichas pérdidas: tipo de fibra, tamaño y material del recubrimiento, herramientas de terminación, etc. Las fibras ópticas de plástico se caracterizan por tener mayor tamaño y apertura que las fibras de vidrio, por lo que captan más luz en condiciones que requieren una menor precisión, permitiendo su uso con dispositivos de bajo coste. Por otra parte, presentan una atenuación más alta y anchos de banda menores que las fibras de vidrio, por lo que su aplicación fundamental es como medio de transmisión en redes de corto alcance, como son las redes domésticas o las redes dentro de medios de transporte (automóviles, aviones, etc.). La topología de estas redes exige un gran número de conectores, por lo que es necesaria una caracterización exacta de sus pérdidas y de los factores que las determinan para poder realizar un diseño de red fiable.

En este proyecto se han caracterizado *conectores* de tipo *ST*, para fibras de *PMMA* (*polimetil-metacrilato*) de 1 mm de diámetro total y de dos tipos: fibras de un solo núcleo (*SC-POF*) y fibras de múltiples núcleos (*MC-POF*). En primer lugar, se ha definido un procedimiento experimental para la obtención de las pérdidas del conector, el cual se ha aplicado utilizando distintas herramientas de terminación cuyo impacto es muy importante en la conectorización. De forma simultánea, se ha realizado un análisis de la facilidad de manejo, la fiabilidad y la durabilidad de dichas herramientas. Como conclusiones, además de obtener una estimación fiable de las pérdidas del conector en todas las condiciones testeadas, se ha determinado el procedimiento y la herramienta de terminación idóneos para cada tipo de fibra.

Además, se ha buscado explicación a las diferentes pérdidas en conectores para fibras de uno y múltiples núcleos. Para ello, se han analizado los diferentes desalineamientos que afectan el proceso de conectorización y particularmente, el desalineamiento rotacional que afecta exclusivamente a la *MC-POF* y puede explicar las diferencias con la *SC-POF*. Con este fin se ha desarrollado un montaje experimental que permite el estudio del desalineamiento por rotación sobre el eje de las fibras y de los producidos por su separación en la dirección de dicho eje y de su transversal. Con este sistema se han medido las pérdidas por desalineamientos rotacional, transversal y longitudinal para fibras de múltiples núcleos, tanto por separado como en combinación y los resultados experimentales han sido comparados con las predicciones obtenidas con modelos matemáticos simples. Como conclusiones se muestra una evaluación del impacto de los diferentes desajustes en las pérdidas de inserción del conector y se propone que el desalineamiento rotacional puede ser la razón de las pérdidas más elevadas encontradas para conectores de fibras de múltiples núcleos en comparación con las de las fibras de un solo núcleo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
ÍNDICE DE CONTENIDOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 OBJETIVO DEL PROYECTO	7
1.2 FASES DEL PROYECTO.....	8
1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	9
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST.....	10
2.1 FIBRAS ANALIZADAS	10
2.2 HERRAMIENTAS DE TERMINACIÓN	12
2.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE MEDIDA.....	14
2.4 PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA LAS DISTINTAS FIBRAS	15
2.5 VALORACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE	17
2.6 DIFERENCIAS ENTRE FIBRAS DE UNO Y MÚLTIPLES NÚCLEOS	19
CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.....	20
3.1 MÉTODO EXPERIMENTAL PARA MEDIDAS DE DESALINEAMIENTOS.....	20
3.1.1 SISTEMA EXPERIMENTAL.....	21
3.1.2 PROTOCOLO DE MEDIDAS	22
3.2 DESALINEAMIENTO ROTACIONAL	22
3.3 INFLUENCIA DE LOS DESALINEAMIENTOS TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL.....	26
3.3.1 DESALINEAMIENTO LONGITUDINAL.....	26
3.3.2 DESALINEAMIENTO TRANSVERSAL	27
3.3.3 COMBINACIÓN CON EL DESALINEAMIENTO ROTACIONAL	28
3.3.4 COMBINACIÓN DE DESALINEAMIENTOS LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL...	30
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	31
4.1 APORTACIONES DEL PROYECTO.....	32
4.2 LÍNEAS DE CONTINUACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO	33
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	34

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ANEXOS

ANEXO. A. LA FIBRA DE PLÁSTICO. PARÁMETROS DE INTERÉS EN COMUNICACIONES	37
A.I MATERIALES USADOS EN FIBRA DE PLÁSTICO	38
A.II CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	39
A.III ATENUACIÓN.....	41
A.IV DISPERSIÓN Y ANCHO DE BANDA	43
ANEXO. B. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DE FIBRAS, HERRAMIENTAS Y DISPOSITIVOS.....	45
B.I FIBRAS.....	45
B.I.I FIBRA ESKA MITSUBISHI, GH-4001	45
B.I.II FIBRA TORAY, PGU-FB1000.	47
B.I.III FIBRA HFBR-RUS100Z.....	48
B.I.IV FIBRA ASHI KASEY, SMCK-1000.....	49
B.II CONECTORES	50
B.II. I CONECTOR ST	50
B.II. II CONECTOR VL	51
B.III DISPOSITIVOS	52
B.III.I EQUIPO FOTEC	52
B.III.II CÁMARAS	53
B.III.III MEDIDOR DE POTENCIA THORLABS	54
ANEXO. C. SOFTWARE UTILIZADO.....	57
C.I PROGRAMA DE CONTROL DEL MEDIDOR THORLABS	57
C.II SOFTWARE PARA CONTROL DE CÁMARA DINO-LITE	59
C.III SOFTWARE DE ALINEACIÓN DE MOTORES	60
C.IV PROGRAMA DE CONTROL DE SISTEMA EXPERIMENTAL	62
C.V PROGRAMAS DESARROLLADOS	63
ANEXO. D. ARTÍCULOS PUBLICADOS	64
D.I ICTON 14	64
D.II URSI 14	69

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura. 1. Fibras de uno y múltiples núcleos de salto de índice	10
Tabla. 1. Fibras casos de estudio, un núcleo y múltiples núcleos.	11
Figura. 2. Conector ST para fibra de 1.2 mm y 2.2 mm.....	11
Figura. 3. Cortadora de fibra (Cortadora A).....	12
Figura. 4. Cortadora desechable (Cortadora B).....	12
Figura. 5. Cortadora profesional (Cortadora C)	12
Figura. 6. Micro-Strip TM peladora de precisión	13
Figura. 7. Sistema de lijas y líquido de pulido. Proceso de pulido.....	13
Figura. 8. Pérdidas por conectorización con y sin pulido. Media y desviación estándar	15
Tabla. 2. Optimización de cortadora-fibra sin aplicar el proceso de pulido.....	16
Figura. 9. Histograma de las pérdidas sin pulido y con pulido	16
Figura. 10. Histograma para cada cortadora sin aplicar el proceso de pulido	17
Figura. 11. Incremento de pérdidas entre un corte y el siguiente.....	18
Figura. 12. Histograma de pérdidas después de aplicar el proceso de pulido	19
Figura. 13. Desalineamiento rotacional en fibras de múltiples núcleos	21
Figura. 14. Sistema experimental para el cálculo de las pérdidas por desalineamientos	21
Figura. 15. Tipos de desalineamientos posibles entre dos fibras	22
Figura. 16. Desalineamiento rotacional. Fibras SMCK-1000 y EAA-MC	23
Figura. 17. Desalineamiento rotacional. Simulación	24
Figura. 18. Sección transversal de las fibras de plástico de varios núcleos	24
Figura. 19. Desalineamiento longitudinal. Fibras de múltiples núcleos.....	26
Figura. 20. Desalineamiento transversal. Fibras de múltiples núcleos.....	28
Figura. 21. Combinación de desalineamiento longitudinal y rotacional	29
Figura. 22. Combinación de desalineamiento transversal y rotacional	29
Figura. 23. Combinación de desalineamientos longitudinal y transversal	30
Figura. I. Ilustración de la sección transversal de la fibra de plástico.	37
Figura. II. Estructura molecular del PMMA.	38
Tabla. I. Materiales de fabricación de recubrimientos	39
Figura. III. Propagación de las ondas en el interior de la fibra óptica.	39
Figura. IV. Comparación de NA y diámetro de distintas fibras ópticas.	40
Figura. V. Fibra de plástico de múltiples núcleos (19).	40
Figura. VI. Fibra de plástico de múltiples núcleos SI (Salto de índice).	41
Figura. VII. Fibra de plástico de múltiples núcleos DSI (Doble salto de índice).	41
Figura. VIII. Curvas de atenuación de SI-POF	41

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura. IX Espectros de atenuación de distintos tipos de PMMA-POF (SI, GI).....	42
Figura. X Dispersión	43
Figura. XI Diferencia de caminos de rayos en SI-POF	44
Figura. XII Diferencia de caminos de rayos en GI-POF	44
Figura. XIII Definición de ancho de banda	44
Figura. XIV Hoja de datos de la fibra Eska Mitsubishi, GH-4001	45
Figura. XV Curvas características de la fibra Eska Mitsubishi, GH-4001	46
Figura. XVI Hoja de datos de la fibra Toray, PGU-FB1000.....	47
Figura. XVII Hoja de datos de la fibra HFBR-RUS100Z	48
Figura. XVIII Hoja de datos de la fibra Ashi Kasey, SMCK-1000.	49
Figura. XIX Hoja de datos del conector ST.	50
Figura. XX Conector VL.....	51
Tabla. II Características del sistema de medidas Fotec.....	52
Tabla. III Características de la cámara Dino-Lite.	53
Figura. XXI Medidor de potencia Thorlabs	54
Tabla. IV Características del medidor de potencia Thorlabs.	55
Tabla. V Hoja de datos del medidor de potencia Thorlabs.	56
Figura. XXII Captura del programa de control del medidor de potencia Thorlabs.....	57
Figura. XXIII Captura del programa de control de la cámara Dino-Lite.....	59
Figura. XXIV Captura del programa NSC200 NewStep Controller Utility: centrado.....	60
Figura. XXV Captura del programa NSC200 NewStep Controller Utility: configuración.....	61
Figura. XXVI Captura del programa Conector_Pérdidas	62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

El proyecto se enmarca en la línea de investigación de fibras ópticas de plástico (*POF*), actualmente financiada por el proyecto de investigación “*Integración de la fibra óptica de plástico en aeronaves*” integrado en el proyecto *Fibra óptica de plástico: Fabricación y modelización. Su aplicación a redes ópticas de corto alcance y sensores*, coordinado con la *Universidad del País Vasco* y la *Universidad Carlos III de Madrid*. En este proyecto participan varios miembros del departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones en colaboración con investigadores de la Universidad de la Ciudad de Nueva York (*College University of New York, CUNY*). El grupo de investigación de *CUNY* trabaja además con *The Boeing Company*, empresa que ha mostrado su interés en la fibra de plástico como base para el desarrollo de redes de comunicaciones en los aviones. Dentro de la investigación en *POF*, el grupo ha trabajado tanto en la caracterización experimental y modelado de fibras de plástico de un solo núcleo para su integración en entornos de simulación de sistemas, como en la aplicación de estas fibras en redes de comunicaciones de corto alcance [1-5].

Aunque la *POF* se ha establecido como medio de transmisión dentro del automóvil y se han dado pasos importantes para introducirla como base de las redes dentro del hogar, el reto es lograr integrarla como el principal medio de transmisión en redes de corto alcance [6,7]. Aunque en general las fibras de plástico presentan mayor atenuación y menor ancho de banda que las fibras de vidrio, esto no supone un obstáculo para su aplicación en este tipo de redes debido a las cortas distancias de enlace requeridas en estos entornos. Por otra parte, la fibra de plástico presenta varias ventajas sobre la fibra de vidrio. En primer lugar, su gran tamaño y fácil manipulación reducen los costes de instalación, a la vez que, permiten su uso con fuentes de luz visible y detectores relativamente baratos. En segundo lugar, su resistencia a diversos agentes externos y sus bajas pérdidas por curvaturas las sitúan como mejor candidato para el tipo de entorno frecuente en redes de corto alcance [8]. Estas redes y particularmente las redes integradas dentro de un avión, presentan una alta conectividad lo que hace fundamental un estudio completo del proceso de conectorización buscando no sólo obtener medidas fiables de las pérdidas del conector, sino también definir una metodología adecuada para minimizar dichas pérdidas.

1.1 OBJETIVO DEL PROYECTO.

El proyecto se centra en el análisis de las pérdidas en conectores de fibras de plástico, profundizando en la caracterización del proceso de conectorización para fibras de un solo núcleo (*SC-POF*) que habían sido tratadas en un proyecto anterior [9] y realizando por primera vez dicha caracterización para fibras de múltiples núcleos (*MC-POF*). Recientemente, la fibra de plástico de múltiples núcleos ha suscitado un especial interés como medio de transmisión en redes dentro de aviones debido a sus menores pérdidas por curvaturas. Esto ha motivado que el grupo haya abordado la caracterización y modelización de la fibra y de sus componentes asociados como, por ejemplo, los conectores.

La motivación de centrarnos en el análisis de los conectores para *POF* es que el diseño de cualquier red de corto alcance conlleva la instalación de un número considerable de conectores. En concreto, un diseño típico de una red para transmisión de datos dentro de un avión puede tener decenas de conectores, por lo que resulta fundamental conocer de forma exacta y reducir en lo posible sus pérdidas de inserción [6]. En varios estudios [10,11] se ha determinado que los conectores, además de introducir pérdidas de potencia, afectan a su distribución de forma

distinta según su posición relativa dentro de la red, modificando las propiedades de transmisión de la fibra cuyo impacto es muy importante en la determinación de sus prestaciones. Así pues, en este proyecto, el objetivo no es sólo obtener experimentalmente las pérdidas globales del conector, sino analizar los factores que influyen en ellas y determinar la forma de minimizarlas. Para ello se realizará un análisis detallado de las herramientas de terminación y de las técnicas de optimización de la conectorización, teniendo en cuenta los distintos factores que influyen en el proceso completo. Esta metodología de conectorización y obtención de pérdidas de inserción servirá como base en el futuro para obtener un modelo más completo del conector integrable en entornos de simulación de redes [9].

Además de la calidad de la terminación de los extremos de las fibras, otro factor importante en la conectorización es su falta de alineamiento en los distintos ejes: longitudinal, transversal y de rotación. Por ello, se actualizará un sistema experimental que permitirá realizar un estudio de las pérdidas adicionales causadas por los posibles desalineamientos que afectan a las fibras de múltiples núcleos, similar al realizado con anterioridad para fibras de un solo núcleo [12]. En particular, se estudiará el desalineamiento por rotación de la fibra respecto a su eje que afecta exclusivamente a las fibras de múltiples núcleos. Con el análisis de estas medidas, se determinará el impacto de cada uno de los desalineamientos en las pérdidas totales y cómo se puede mitigar su efecto.

De esta forma, al final del proyecto, tendremos una cuantificación exacta de las pérdidas de los conectores para distintos tipos de fibras y un conocimiento más amplio de los procedimientos de terminación y desalineamientos que permitirán optimizar el proceso de conectorización a cualquier técnico que prepare la instalación de una red con *POF*.

1.2 FASES DEL PROYECTO.

Este proyecto se puede estructurar en las siguientes fases:

- Análisis y valoración de las herramientas de terminación para la preparación de conectores en fibras de plástico de un núcleo y de múltiples núcleos.
- Estudio estadístico de las pérdidas en los *conectores ST* para fibra de plástico de un núcleo y de múltiples núcleos.
- Desarrollo de un sistema experimental para medir las pérdidas producidas por los distintos desalineamientos entre fibras de múltiples núcleos, validando dichos resultados con los modelos existentes y analizando su influencia en un conector.

Para el cumplimiento de los objetivos es necesario realizar un análisis de las herramientas de terminación disponibles con el fin de determinar cuál es la más adecuada para cada fibra, ya que en un estudio anterior [9], se observó que incluso para fibras de las mismas características, los resultados de conectorización eran diferentes dependiendo de distintos factores.

Este análisis de las herramientas y procedimientos de terminación de las fibras se llevará a cabo simultáneamente a la determinación experimental de las pérdidas, debido a que los parámetros más importantes en la determinación del procedimiento adecuado, para cada tipo de fibra, son precisamente las pérdidas del conector y la variabilidad de las mismas, aunque también se tendrán en cuenta otros en la valoración.

Una vez determinada la herramienta más adecuada para cada tipo de fibra, se realizará un sistema experimental que permita medir la variación de las pérdidas con los posibles

desalineamientos entre dos fibras de múltiples núcleos. Para el caso de la fibra de un solo núcleo se realizó un estudio similar [12] obteniendo una superficie de pérdidas en función del desalineamiento longitudinal y transversal. En el caso de las fibras de múltiples núcleos tenemos otro grado de libertad, la rotación sobre su eje, que determina la posición relativa de los núcleos, el cual puede tener gran impacto en las pérdidas del conector. Este desalineamiento rotacional se estudiará en combinación con los desalineamientos transversal y longitudinal modificando el sistema experimental previamente desarrollado. Las medidas de pérdidas bajo distintos desalineamientos, además de permitirnos estimar como se modifican las pérdidas en el conector por variabilidad dentro del proceso de conectorización (por ejemplo, si las fibras quedan más separadas de lo normal) permitirán modelar otros tipos de conectores como los *ST* de *air-gap* en los que las fibras se encuentran intencionalmente separadas, así como algunos efectos consecuentes a las vibraciones, frecuentes en el entorno de aplicación.

1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.

Los contenidos de la memoria se desarrollan de la siguiente forma. En el siguiente capítulo: “*Análisis de las pérdidas de inserción para el conector ST*” se presenta el estudio de las pérdidas del conector ST [13], describiendo las fibras testeadas, las herramientas utilizadas y los protocolos de medida. En el mismo, se presentan los resultados de pérdidas para todas las condiciones, así como una valoración de las herramientas de terminación basada no sólo en dichos resultados, sino también, en otros factores como son: la variabilidad, la manejabilidad, la durabilidad, etc.

En el capítulo “*Desalineamientos entre fibras de múltiples núcleos*” se describe el sistema experimental para la obtención de las pérdidas introducidas en el desalineamiento por rotación, que es exclusivo de las fibras de múltiples núcleos y que como veremos, puede explicar las mayores pérdidas en conectores para fibras de múltiples núcleos. Estas pérdidas se determinan tanto de forma aislada como en combinación con otros desalineamientos, ya que en la conectorización es probable que aparezcan conjuntamente.

Para terminar, en el capítulo de “*Conclusiones*” se resumen todos los resultados obtenidos y se analizan en el contexto de la aplicación de la *POF* en redes de comunicaciones, presentando posibles líneas de trabajo dentro del grupo de investigación para el futuro relacionadas con este proyecto.

Además, se han incluido como *Anexos*: una introducción a las fibras ópticas de plástico donde se describe su estructura, sus propiedades como medio de transmisión y las características de los principales tipos de fibras de plástico (*Anexo A*); las hojas de características de las fibras, herramientas y dispositivos utilizados en el proyecto (*Anexo B*); una descripción de los entornos y programas para control de instrumentos y procesamiento de datos (*Anexo C*); y, por último, dos artículos con los resultados obtenidos en este proyecto que van a ser presentados en sendos congresos.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST.

En este capítulo se presenta la caracterización de las pérdidas en *conectores estándar ST* para fibras de plástico de un solo núcleo y de múltiples núcleos de distintos fabricantes. En primer lugar, se presentan las fibras analizadas y se describen las herramientas de terminación utilizadas, así como el protocolo empleado para estimar las pérdidas del conector. En segundo lugar, se muestran los resultados obtenidos para cada fibra con las distintas cortadoras, que constituye la herramienta fundamental dentro del proceso de conectorización. El análisis de estos resultados permite determinar la herramienta idónea para cada tipo de fibra, así como obtener las pérdidas del conector en distintas condiciones. Por último, se realiza un análisis de las distintas cortadoras basado en la calidad de terminación resultante, tanto desde un punto de vista cuantitativo (pérdidas medias y variabilidad) como cualitativo, valorando cada herramienta de acuerdo a su versatilidad, a la facilidad de manipulación y el tiempo empleado en la preparación del conector, así como a la duración de su vida útil.

2.1 FIBRAS ANALIZADAS.

En el *Anexo A* se ha realizado una introducción a las fibras de plástico, describiendo los materiales de fabricación más frecuentes, los distintos tipos de fibras atendiendo a diferentes parámetros y sus características más importantes [14]. Todas las fibras analizadas en este proyecto se han fabricado con *polimetil-metacrilato (PMMA)* y tienen un perfil de índice de salto. Se han estudiado 5 fibras de un solo núcleo de *PMMA*, por encima del cual se encuentra la cubierta, que es una capa muy fina de otro material plástico con menor índice de refracción. Todas estas fibras tienen un núcleo de 1 mm de diámetro con un tamaño total de 2.2 mm, incluyendo el recubrimiento y una apertura numérica nominal de 0.5, además en sus hojas de características consta que este recubrimiento protector o jacket es de *polietileno*. Estas fibras son de distintos fabricantes aunque sus características son muy similares: *PGU-FB1000 (Toray)*, *ESKA-PREMIER GH4001 (Mitsubishi)* con dos tipos de recubrimiento: negro (*BGH*) y blanco (*WGH*), *HFBR-RUS100Z (Avago)* y la fibra *EAA-SC* especial para aplicaciones dentro de aeronaves. La *Fig. 1* muestra de forma esquemática la estructura de ambos tipos de fibra y su perfil de índices de refracción.

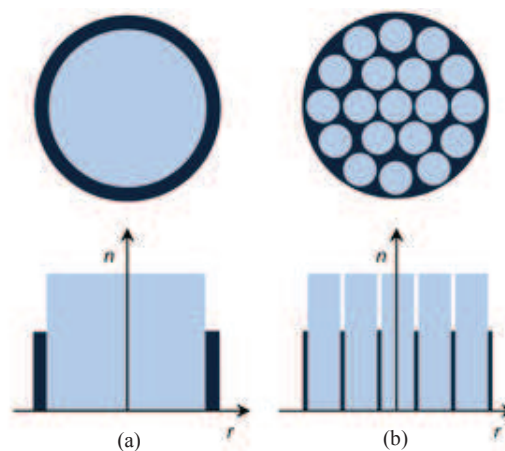


Figura. 1. (a) Fibra de plástico de un solo núcleo con perfil de salto de índice. (*SC-POF*).
(b) Fibra de plástico de múltiples núcleos con perfil de salto de índice. (*MC-POF*).

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

Las dos fibras de múltiples núcleos con las que se ha trabajado presentan un tamaño total de 0.9 mm que incluye 19 núcleos con un diámetro de $225\text{ }\mu\text{m}$. Una de ellas (*EAA-MC*) tiene un recubrimiento de 1.2 mm y está especialmente diseñada para su instalación dentro de un avión. La otra fibra es la *SMCK-1000* fabricada por *Ashi Kasei* y su tamaño total es de 2.2 mm , al igual que las fibras de un solo núcleo con las que se ha trabajado en este proyecto. La apertura numérica nominal (*NA*) de esta fibra es de 0.6 y el material del recubrimiento es también *polietileno*. En la *Tabla. 1* se presenta un resumen de las fibras utilizadas en el proyecto cuyas hojas de características se encuentran en el *Anexo B*. No se dispone de hojas de características de las fibras especiales para aviónica, ya que han sido suministradas por la compañía *Boeing* a través de nuestros colaboradores en *CUNY*. De aquí en adelante, nos referiremos a cada una de estas fibras utilizando las siguientes siglas: *PGU*, *BGH*, *WGH*, *HFB*, *EAA-SC*, *EAA-MC* y *SMCK-1000*.

Un núcleo	Múltiples núcleos
<i>ESKA-PREMIER GH4001 (Mitsubishi) (negra) [BGH]</i>	<i>EAA-MC*</i>
<i>ESKA-PREMIER GH4001 (Mitsubishi) (blanca) [WGH]</i>	<i>SMCK-1000</i>
<i>HFB-RUS100Z (Avago) [HFB]</i>	
<i>PGU-FB1000 (Toray) [PGU]</i>	
<i>EAA-SC*</i>	

Tabla. 1. Fibras casos de estudio, un núcleo y múltiples núcleos.

*Fibra suministrada por Boeing a nuestros colaboradores de CUNY (*City University of New York*), diseñada específicamente para aplicaciones de aviónica con resistencia a altas temperaturas.

Para las fibras de múltiples núcleos con 1.2 mm de diámetro se utilizan *conectores ST* (suministrados por *Boeing*) cuyo interior está modificado para ofrecer sujeción suficiente a esta fibra de menor tamaño *Fig. 2 (a y b)*. Los *conectores ST* utilizados para las fibras de 2.2 mm , tanto de uno como de múltiples núcleos, son los estándares para *POF*, *Fig. 2 (c y d)*. El aspecto exterior de los conectores (*a y b*) es similar al de los *conectores ST* estándar (*c y d*), pero el agujero interior tiene una forma cónica en lugar de cilíndrica uniforme. Esta forma implica diferencias en la terminación de las fibras previo a su conectorización y tiene el objetivo de impedir la rotación de la fibra una vez dentro del conector, disminuyendo las pérdidas por rotación de los núcleos. Este es un factor importante en las pérdidas de conectorización de fibras de múltiples núcleos y será tratado en el siguiente capítulo.

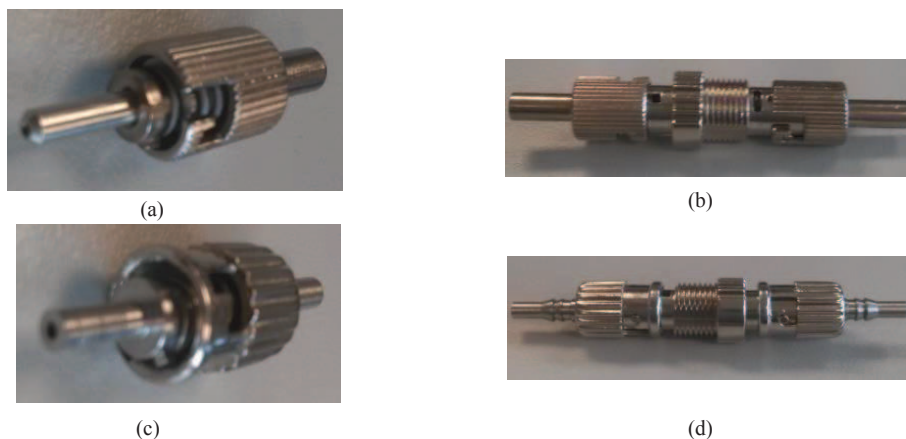


Figura 2. (a) Conector simple ST para fibra 1.2 mm (*EAA-MC*). (b) Doble conector ST para fibra 1.2 mm (*EAA-MC*). (c) Conector simple ST para fibra de 2.2 mm (*PGU*, *BGH*, *WGH*, *HFB*, *EAA-SC*, *SMCK-1000*). (d) Doble conector ST para fibra de 2.2 mm (*PGU*, *BGH*, *WGH*, *HFB*, *EAA-SC*, *SMCK-1000*).

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

2.2 HERRAMIENTAS DE TERMINACIÓN.

Como se ha mencionado antes y se demostró en un estudio previo [9], las pérdidas del conector dependen fundamentalmente de la calidad de la terminación de las fibras que se conectorizan y por tanto, es fundamental caracterizar las herramientas que vamos a utilizar. Además, teniendo en cuenta que las fibras son de distintos fabricantes y que sus recubrimientos, aunque en principio están fabricados a base de *polietileno*, pueden presentar variaciones de este mismo material con distintas características, habrá que determinar el método de terminación más adecuado para cada fibra. En esta *sección*, se describe el método de terminación para fibras de plástico y se presentan las herramientas necesarias para realizarlo.

El método de terminación en general para fibras de plástico consiste en cortar la fibra antes de quitar el recubrimiento. Las herramientas de corte o cortadoras son las encargadas de realizar dicho corte, que será mejor cuanto más perpendicular al eje de la fibra se realice y más homogénea sea la superficie resultante. Las cortadoras que hemos utilizado se muestran en las *Fig. 3, 4, 5*.



Figura 3. Cortadora de Fibra. (Cortadora A)



Figura 4. Cortadora Desechable. (Cortadora B)



Figura 5. Cortadora Profesional. (Cortadora C)

La *cortadora A* [15] en la *Fig. 3* permite trabajar tanto con fibras simples como con fibras dobles de 1.5 y 2 mm de diámetro de recubrimiento y a diferencia de las demás no necesita de una superficie plana para el corte; pero si de una buena sujeción por parte del operario. Además presenta una excelente vida útil (hasta 5000 cortes según recomendación del fabricante).

La *cortadora B* [16] de la *Fig. 4* permite trabajar con fibras simples entre 0.75 y 1 mm de diámetro de fibra pelada y fibras con 2.2 mm de diámetro con recubrimiento. Es una cortadora que necesita de una superficie plana de apoyo, pero además su respuesta está muy condicionada a la estabilidad con que se realice el corte. Aunque lo recomendado por el fabricante es un solo corte, se ha determinado que pueden realizar algunos más sin perder calidad.

La *cortadora C* [17], *Fig. 5* permite trabajar con diferentes tamaños de fibras, incluyendo fibra pelada (0.9 - 1 mm). El número de cortes máximo recomendado por el fabricante es de 50, su uso es bastante simple pero es extremadamente delicada y precisa de una superficie plana de apoyo.

Una vez tenemos cortada la fibra será necesario retirar el recubrimiento del extremo. La herramienta mostrada en la *Fig. 6*, *Micro-Strip™ Precisión Stripper* [18], es la que hemos utilizado para quitar el recubrimiento debido a la rapidez del pelado y al hecho de que no se daña la fibra en el procedimiento.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST



Figura 6. Micro-Strip™ peladora de precisión.

El sistema de pelado consiste en deslizar la fibra por un orificio o ranura, presionar con la herramienta para cortar el recubrimiento sin llegar a la propia fibra y tirar para retirarlo. Para los conectores de fibra de 2.2 mm será necesario retirar unos 17 mm de recubrimiento, mientras que para el caso de los conectores específicos para la fibra de EAA-MC será necesario retirar unos 25 mm de recubrimiento, ya que son más estrechos en su interior para evitar que la fibra se mueva.

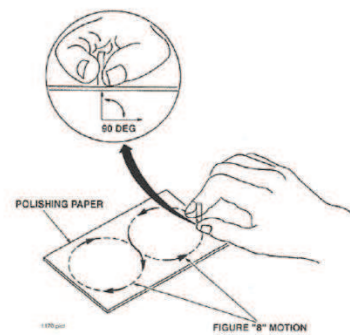
Una vez realizados los procesos de corte y pelado de la fibra, es posible considerar acabado el proceso de terminación; pero también pueden mejorarse las terminaciones mediante un proceso de pulido. Este proceso permite eliminar rugosidades y dejar una superficie homogénea. En este punto debemos prestar especial atención a que la fibra después de pelada quede rasa respecto al extremo del conector, sin que sobresalga.

Existe otro tipo de herramienta que permite realizar el proceso de corte junto con el proceso de pulido. Una de estas herramientas, disponible en el laboratorio, *Kress 530FM* [19], fue testeada pero los resultados obtenidos frente al proceso de corte y pulido con lijas fueron inferiores en calidad.

El sistema de pulido que hemos utilizado está basado en el uso de lijas de distinto granulado [20]. En la *Fig. 7* se muestra un esquema de cómo realizar un proceso de pulido y algunos de los útiles recomendados para ello.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Sistema de lijas y líquido de pulido, (b) Movimiento en el proceso de pulido.

El sistema consta de dos lijas: una de grano duro y otra de grano fino, un líquido especial (*polishing slurry*) [21] para facilitar el lijado y un disco [22] para soportar la fibra durante el lijado *Fig. 7 (a)*, de forma que la punta de la fibra y la lija estén colocadas perpendicularmente durante todo el proceso de pulido. Este procedimiento se aplica una vez que cortamos y pelamos el extremo de la fibra e insertamos el conector que proceda. Para comenzar el pulido, se colocan las lijas sobre una superficie plana donde se pueda trabajar fácilmente (en nuestro caso una alfombrilla de goma sobre una superficie de vidrio). Primero se vierte una gota de líquido sobre

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

la lija de grano duro (*2000-grit polishing paper*) y se realizan movimientos con la fibra formando un ángulo de 90° con el papel de lija como se muestra en la *Fig. 7 (b)*. Haciendo este movimiento en forma de “ocho” se intenta que la fibra se vaya puliendo igual en toda su superficie de forma que ésta quede plana y homogénea.

A continuación se repite el mismo proceso con la lija de grano fino (*3 μm polishing paper*). Tras retirar el disco que soporta la fibra ya tenemos el conjunto fibra-conector. Este proceso se realiza para cada uno de los extremos que se van a conectorizar, por lo que el proceso de conectorización completo, es considerablemente más largo cuando se aplica el pulido, evidentemente dependiendo también de la calidad del corte inicial.

2.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE MEDIDA.

Para la caracterización de las pérdidas de inserción de los conectores se van a utilizar los instrumentos específicos para caracterización de la *POF* de la marca *FOTEC* [23] que incluye una fuente óptica y un medidor de potencia. La fuente es un *LED* que emite en 665 nm . El medidor de potencia está basado en un detector de silicio con un rango de operación de 10 a -70 dBm ($1\text{ mW} - 10\text{ mW}$).

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

- i) Tomamos como referencia la medida de la potencia (P_0) para un tramo corto de fibra (entre 75 y 150 cm).
- ii) Este tramo de fibra se corta en dos segmentos aproximadamente iguales. Una vez que tenemos los dos tramos de fibra cortados, se preparan con la herramienta de terminación correspondiente para insertarlos en un conector simple.
- iii) Cuando tengamos los dos tramos con sus conectores simples los unimos mediante un conector hembra-hembra similar al presentado en la *Fig. 2 (a y c)*. Con esta configuración se mide de nuevo la potencia (P_c).
- iv) Una vez tomada la medida anterior, se procede a realizar el proceso de pulido en cada uno de los extremos conectorizados. Se unen de nuevo con el doble conector y se mide la potencia recibida (P_{cp}).
- v) Las pérdidas de inserción del conector en dB las podremos calcular mediante las expresiones:

$$\text{Pérdidas}(\text{sin pulido}) = 10\log\left(\frac{P_c}{P_0}\right) \quad [2.1]$$

$$\text{Pérdidas}(\text{con pulido}) = 10\log\left(\frac{P_{cp}}{P_0}\right) \quad [2.2]$$

De esta manera podemos cuantificar la mejora en las pérdidas que supone el pulido para cada caso. Este proceso se ha llevado a cabo para las 7 fibras analizadas con cada una de las 3 cortadoras descritas en la *Sección 2.2*. Se han realizado al menos 8 medidas para cada una de las 21 condiciones (tipo de *fibra-cortadora*). Además, como se ha dicho antes, para cada uno de los conectores se ha realizado una medida previa al proceso de pulido y otra tras el pulido. Para cada una de las cortadoras, se ha contabilizado el número de cortes realizados para poder llevar a cabo posteriormente un análisis comparativo de su degradación por uso. También, para el cálculo de la media de las pérdidas se han descartado tanto aquellas medidas realizadas durante

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

el proceso de aprendizaje, como aquellas tomadas a partir del momento en el que se alcanza el límite de validez de la cortadora determinado por un aumento sistemático del valor de las pérdidas.

2.4 PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA LAS DISTINTAS FIBRAS.

En esta *sección* se presentan los resultados obtenidos para todos los tipos de fibras con las 3 cortadoras analizadas. La *Fig. 8. a)*, muestra la media y la desviación estándar de las pérdidas para el caso con terminación sin pulido y la *Fig. 8. b)*, después de realizar el proceso de pulido. La media se representa como una barra en distintos colores para las distintas fibras y la desviación estándar se muestra como una línea sobre su correspondiente barra.

En la *Fig.8. a)* podemos ver que, tanto la *cortadora A* como la *cortadora B* tienen un comportamiento relativamente homogéneo con todas las fibras con pérdidas entre 1 y 2.5 dB. Por otra parte la *cortadora C*, muestra grandes diferencias (de más de 3 dB) en el comportamiento para distintas fibras. Con esta cortadora se obtienen pérdidas relativamente bajas en las fibras especiales para aviónica y en la fibra *SMCK-1000* (poco más de 1 dB), sin embargo, produce unas pérdidas muy elevadas para las demás fibras. Se puede observar como la desviación estándar es menor en los casos en los que las pérdidas son bajas.

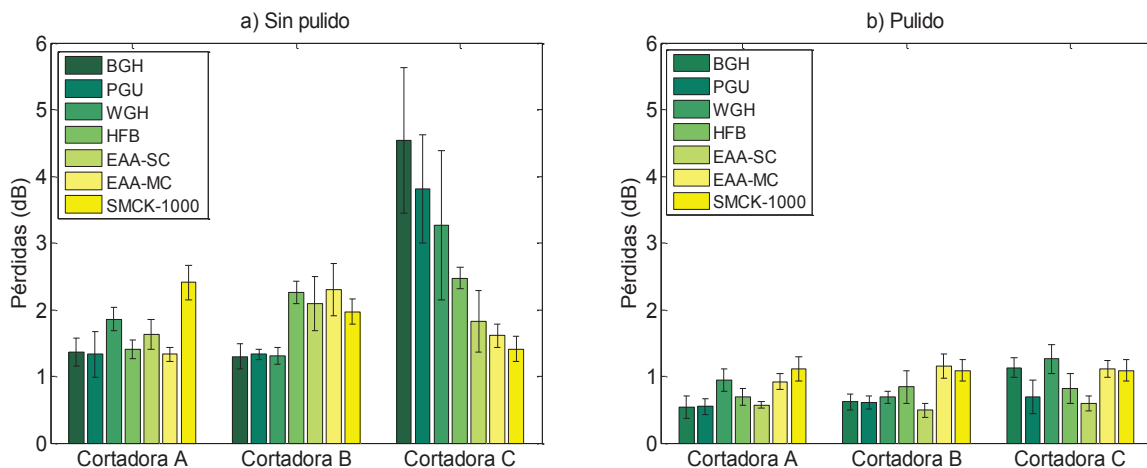


Figura 8. a. Pérdidas introducidas por conectorización, solo el corte, sin pulido.

b. Pérdidas introducidas por conectorización, corte y pulido a dos lijas.

La *cortadora B*, muestra pérdidas y desviaciones pequeñas, para algunas de las fibras estándar de un solo núcleo: *PGU*, *BGH* y *WGH*; pero mayores para el resto, particularmente para la *HFB* y la *EAA-MC*. En el caso de la fibra de múltiples núcleos *SMCK-1000* la desviación estándar con esta cortadora es muy baja aunque sus valores de pérdidas no sean los mejores. De manera general la *cortadora A* es la que presenta un comportamiento más homogéneo para todas las fibras, con pérdidas por debajo de los 2 dB excepto para la fibra *SMCK-1000*; además tiene una reducida desviación estándar que nos da una medida de su estabilidad.

A manera de resumen se presenta la *Tabla. 2*, que permite elegir la cortadora más adecuada para cada tipo de fibra en el caso de que no se vaya a aplicar el proceso de pulido y de la cual se desprende que la *cortadora B* se comporta mejor para algunas fibras de un solo núcleo como la

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

PGU y la *GH*, mientras que la *cortadora A* es mejor para la *HFB* y las fibras especiales para aviónica: *EAA-SC* y *EAA-MC*. Con la *cortadora C* se obtienen peores resultados para la mayoría de las fibras, pero es la mejor para la fibra de múltiples núcleos comercial *SMCK-1000*.

<i>Cortadora</i>	<i>BGH</i>	<i>PGU</i>	<i>WGH</i>	<i>HFB</i>	<i>EAA-SC</i>	<i>EAA-MC</i>	<i>SMCK-1000</i>
<i>Pérdida mínima</i>	<i>B</i>	<i>A/B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
<i>Desviación mínima</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B/C</i>
<i>Pérdida > 2 dB</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>B/C</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>
<i>Desviación > 0.5 dB</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	-	<i>C</i>	-	-

Tabla. 2 Optimización de cortadora-fibra sin aplicar el proceso de pulido.

La comparación de las *Fig. 8 a)* y *b)* permite observar que, en todos los casos, las pérdidas promedio y la desviación estándar disminuyen tras el pulido. Este hecho se produce no sólo en media sino que se ha observado también para cada conector en particular ya que, como se comentó al describir el protocolo de medida, se han obtenido las pérdidas antes y después del pulido para cada conector. Las diferencias de los resultados obtenidos con las distintas cortadoras son menores, puesto que, el proceso de pulido permite igualar la calidad de la terminación. En concreto, es interesante observar la gran mejora que se obtiene al pulir las fibras estándar terminadas con la *cortadora C*, aunque sigue dando pérdidas superiores a las de las otras dos.

Tras el pulido, la *cortadora A* presenta menores pérdidas para prácticamente todas las fibras estudiadas aunque las diferencias entre cortadoras después del pulido son poco significativas. Las elevadas pérdidas obtenidas con la *cortadora A* para la fibra *SMCK-1000* (véase *Fig. 8. a)* disminuyen considerablemente ya que las irregularidades en los cortes obtenidos se reducen fácilmente con el proceso de pulido a costa de invertir más tiempo en dicho proceso. Para visualizar mejor el efecto del pulido se presenta un histograma, *Fig. 9*, con los datos obtenidos para todas las fibras y todas las cortadoras antes y después de aplicar dicho proceso.

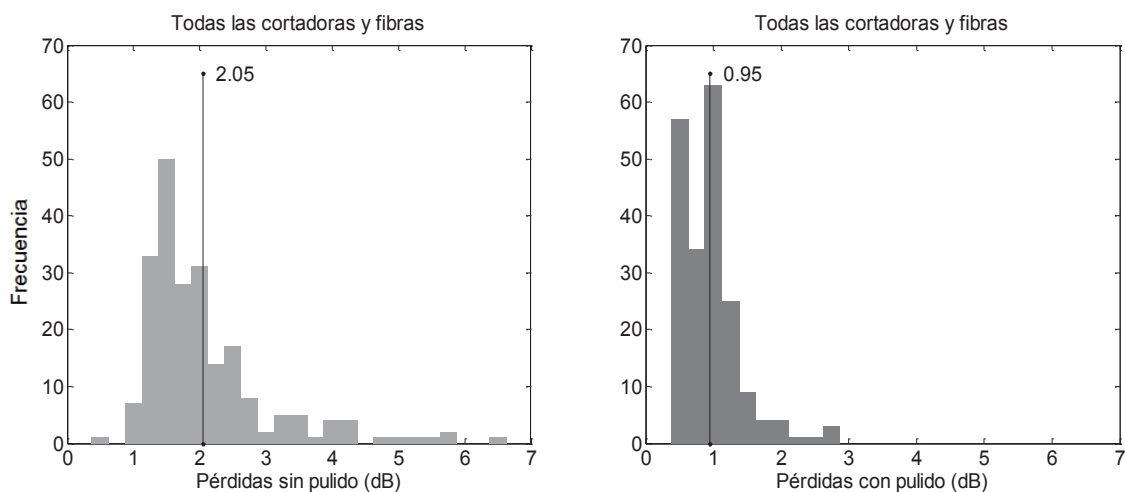


Figura. 9 Histograma de las pérdidas sin pulido (izquierda) y con pulido (derecha).

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

En resumen, las pérdidas medias de un *conector ST* para *POF* (sin distinguir tipo de fibra) según la *Fig. 9* es de 2.05 dB sin pulido y 0.95 dB después de pulir, con una desviación estándar de 0.96 dB y 0.43 dB respectivamente. Estos resultados muestran que la irregularidad introducida con algunas de las cortadoras puede eliminarse durante el proceso de pulido, pero en distinta medida para cada tipo de fibra ya que en algunos casos, estas diferencias o irregularidades en la superficie no son salvables por las hojas de pulido. Estos detalles se discutirán más a fondo en la siguiente *sección* donde se hará una valoración final de cada una de las cortadoras.

2.5 VALORACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE.

En esa *sección* vamos a hacer una valoración de las cortadoras basada fundamentalmente en el valor de las pérdidas y su variabilidad obtenidas en la *Sección 2.4*; pero también teniendo en cuenta otros aspectos como su durabilidad, sencillez y facilidad de manejo. La *Fig. 10* muestra un histograma de las pérdidas obtenidas para cada una de las cortadoras sin aplicar el proceso de pulido. Para el cálculo de estos histogramas se han considerado los resultados obtenidos para todas las fibras testeadas tanto fibras de uno como de múltiples núcleos.

De acuerdo con los resultados mostrados en la *Fig. 8*, la *cortadora A* es la que produce las pérdidas más bajas en media (1.61 dB) y presenta una menor variabilidad. La desviación estándar calculada a partir de los datos de los histogramas es de 0.43 dB . Esta cortadora, a diferencia de las otras, no requiere una superficie de apoyo (véase *Fig. 3*) sino que se afianza a la mano de uso del operario por lo que el resultado depende en parte de la experiencia del mismo. Para garantizar unos buenos resultados es fundamental que en el momento del corte, la fibra se mantenga estable y perpendicular respecto a la cortadora. En general, su manejo es relativamente simple y no requiere un excesivo entrenamiento ni precisión.

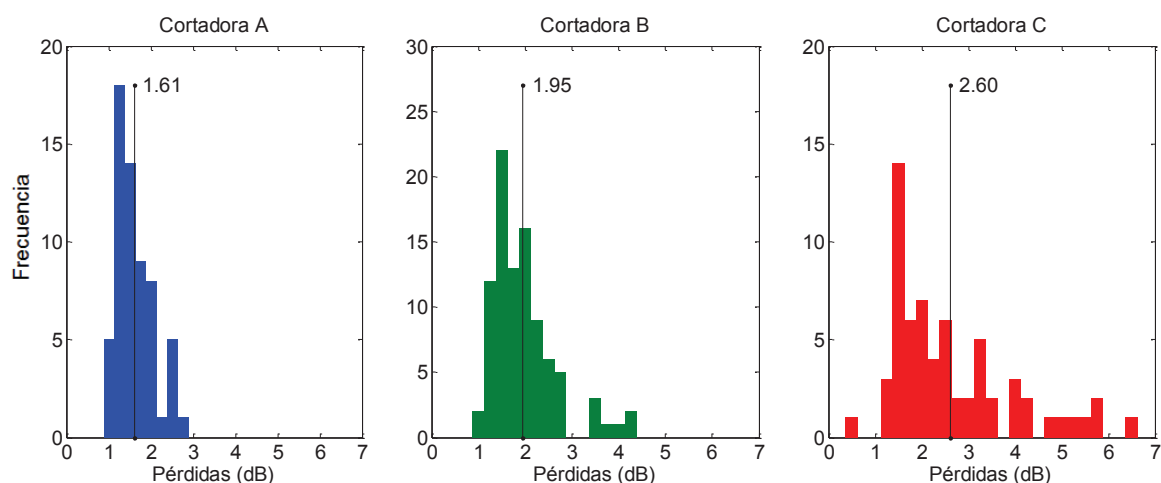


Figura. 10 Histograma para cada cortadora sin aplicar el proceso de pulido.

La *cortadora C* es la que produce mayores pérdidas medias (2.6 dB) y la que presenta mayor variabilidad (desviación estándar de 1.33 dB) debido a las diferencias en su comportamiento para distintos tipos de fibra. Aunque esta cortadora presenta una base lo suficientemente grande y plana (véase *Fig. 5*) como para garantizar un corte estable y perpendicular, se comporta de manera bastante irregular con las fibras que ofrecen mayor resistencia por su estructura o por la

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

dureza de su recubrimiento. Además como sus cuchillas son bastante delgadas se pueden producir muescas en los primeros usos con estas fibras. Por ejemplo para las fibras *PGU* y *GH* la hoja interior se rompe antes de realizar 6 cortes. Esto va unido a mayores pérdidas en el conector que se pueden disminuir con el proceso de pulido como muestra la *Fig. 8*. Sin embargo teniendo en cuenta el tiempo a invertir y el desgaste de las hojas de pulido no es recomendable usar esta cortadora cuando el material del recubrimiento es muy resistente. Por el contrario en las fibras para aplicaciones en aviónica y particularmente en la *SMCK-1000* que presentan un material más blando que las demás, esta cortadora da buenos resultados.

La *cortadora B* se encuentra en una posición intermedia entre la *A* y la *C* con pérdidas medidas de 1.95 dB y desviación de 0.69 dB. Para usar esta cortadora es fundamental realizar el corte apoyando sobre una superficie muy plana y mediante un golpe seco, lo más perpendicular posible. En gran medida los resultados variarán de acuerdo a la precisión del operario, pero una vez obtenida la habilidad es una cortadora que presenta un buen rendimiento en la mayor parte de las fibras de un solo núcleo. Sin embargo, para la fibra de un solo núcleo especial para aviónica, las pérdidas son mayores por lo que requiere un proceso intensivo de pulido. Para fibra de múltiples núcleos esta cortadora es más variable produciendo buenos cortes y otros en los que se aplasta alguno de los núcleos. Otra peculiaridad es que con frecuencia, después de cortar permanecen algunos restos del recubrimiento que son difíciles de eliminar. Por ello es primordial tener especial atención a la limpieza del recubrimiento de la fibra con alcohol antes de realizar un corte.

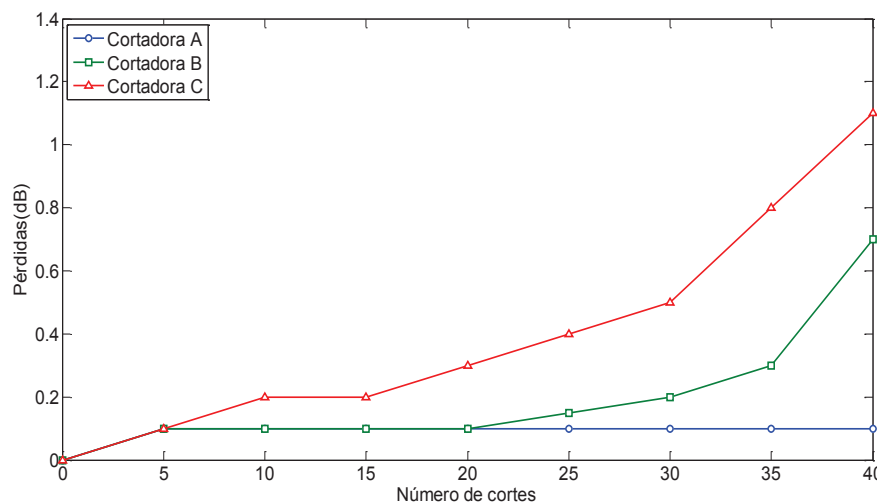


Figura 11. Incremento de pérdidas entre un corte y el siguiente.

En la *Fig. 11* se muestra un estudio sobre la durabilidad de estas cortadoras. Para cada cortadora se utilizaron las fibras con la que se obtuvieron mejores resultados en el estudio de la *Sección 2.4*. En el eje vertical se presenta el aumento de las pérdidas que se produce entre un corte y el siguiente. La hoja de la *cortadora C* se va deteriorando paulatinamente incluso para las fibras más blandas como la fibra de múltiples núcleos, por lo que no es aconsejable utilizarla por encima de 20 cortes si se quieren obtener resultados dentro de lo aceptable. En estos 20 cortes ya se ha tenido en cuenta que se ha reutilizado la misma hoja de cuchilla girándola 180° o utilizando otros agujeros. La *cortadora B*, aunque el fabricante recomienda sólo un corte por agujero, presenta resultados aceptables hasta los 30 cortes por cada uno de sus 4 agujeros y por

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN PARA EL CONECTOR ST

encima de este número de cortes las pérdidas muestran un incremento abrupto. En el caso de la cortadora A, el fabricante recomienda un máximo de 5000 cortes. En nuestros experimentos no nos hemos acercado a este límite de la vida útil de esta herramienta pero los resultados de la Fig. 11 permiten determinar que después de 50 cortes se mantenía invariante, lo cual la define como una herramienta estable y confiable, lo que se suma a sus excelentes resultados en cuanto a pérdidas incluso sin pulido.

2.6 DIFERENCIAS ENTRE FIBRAS DE UNO Y MÚLTIPLES NÚCLEOS.

En el caso de emplear la herramienta idónea para cada tipo de fibra la Fig. 8. b muestra que se pueden obtener como pérdidas de 0.50 dB para fibras de un solo núcleo; mientras que para fibras de múltiples núcleos el mínimo es de 1.10 dB . Aunque el proceso de pulido produce una disminución de las pérdidas en todos los casos, los conectores en fibras con múltiples núcleos siguen teniendo unas pérdidas mayores que las obtenidas para fibras de un solo núcleo. Para verificar este efecto se han representado los histogramas obtenidos con los resultados de todas las fibras de un solo núcleo, en la Fig. 12. a, y las dos fibras de múltiples núcleos en la Fig. 12. b para todas las cortadoras después de aplicar el proceso de pulido. Las pérdidas medias para conectores en fibras de múltiples núcleos son: $1.31\text{ dB} \pm 0.48$ frente a $0.78\text{ dB} \pm 0.28$ para fibras de un núcleo, lo que supone una diferencia de 0.53 dB que es significativa teniendo en cuenta los valores de la desviación estándar.

La explicación de esta diferencia puede encontrarse en que con el sistema de conectorización empleado no se han tenido en cuenta las posiciones relativas de los núcleos de las fibras enfrentadas (véase Fig. 1) ya que las fibras no tienen ninguna marca que permita evitar este desalineamiento por rotación antes de instalar el conector. De esta forma, si las fibras no están bien alineadas en esta dimensión se producirán pérdidas adicionales respecto a las fibras de un solo núcleo. Para verificar esta hipótesis en el siguiente capítulo se presenta un estudio del impacto de este grado de libertad sobre las pérdidas del conector.

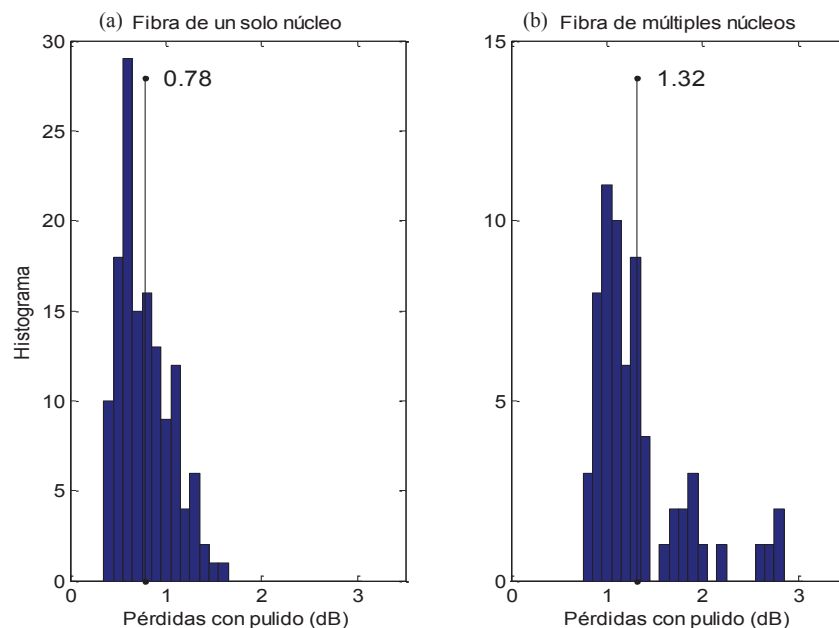


Figura. 12 Histograma de pérdidas después de aplicar el proceso de pulido.
a. Fibras de un solo núcleo. b. Fibras de múltiples núcleos.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

En el proceso de conectorización se pretende que las fibras queden completamente alineadas y muy próximas entre sí. Como las fibras no deben tocarse, ya que podrían dañarse, siempre se encontrarán separadas por lo que existirá un desalineamiento longitudinal remanente. De hecho algunos de los conectores diseñados específicamente para redes de aviones son del tipo “air-gap” (separación de aire). Estos conectores mantienen una distancia longitudinal entre fibras de varias decenas de micras para evitar contacto entre ellas, incluso bajo las fuertes vibraciones que se producen en un avión. Por otra parte, el desalineamiento longitudinal frecuentemente irá acompañado de un desajuste en el enfrentamiento lateral de los núcleos (desalineamiento transversal). En fibras de múltiples núcleos tenemos, además, un nuevo grado de libertad que aparece cuando cada núcleo individual no está perfectamente alineado con su análogo en la otra fibra, debido a la rotación relativa de éstas respecto a su eje (desalineamiento rotacional). En este *Capítulo 3* se aborda la variación en la potencia transmitida debida a la rotación en fibras de múltiples núcleos que se determina tanto por separado como en combinación con los demás tipos de desalineamientos. Los resultados de este análisis, además de determinar si el desalineamiento rotacional es responsable de las diferencias encontradas en la potencia entre los *conectores ST* para fibras de uno y múltiples núcleos en el *Capítulo 2*, permitirán valorar el impacto de los distintos desalineamientos en los conectores de fibra de múltiples núcleos.

De esta forma, en la *Sección 3.1* se aborda el desalineamiento rotacional y se describe un sistema experimental desarrollado para medir las pérdidas por desalineamiento en tres dimensiones: rotacional, longitudinal (en la dirección del eje de las fibras) y transversal (en la dirección perpendicular al eje). Este sistema experimental está basado en un montaje desarrollado para realizar un estudio sobre fibras de un solo núcleo [12] que ha sido convenientemente modificado para medir también las pérdidas por rotación.

En la *Sección 3.2*, se presentan los resultados experimentales para las dos fibras de múltiples núcleos que se han presentado en la *Sección 2.1* del *Capítulo 2*, se comparan con predicciones basadas en el modelo de áreas [14] y con resultados de otros autores [24]. Además, se valora la influencia del desalineamiento rotacional en combinación con otros tipos de desalineamientos.

Por último, para completar el estudio de la fibra de múltiples núcleos, se obtendrá la variación de potencia por desalineamiento transversal y longitudinal combinados, que permitirá cuantificar como afectan estos desalineamientos en la conectorización.

3.1 MÉTODO EXPERIMENTAL PARA MEDIDA DE DESALINEAMIENTOS.

Como se ha comentado en las fibras de varios núcleos, existe un nuevo grado de libertad, además de los desalineamientos transversal y longitudinal, que es la posición relativa de los núcleos, y que, como se ha dicho antes, puede ser la causa de las mayores pérdidas de inserción obtenidas para los conectores en este tipo de fibra. Este tipo de desalineamiento está ilustrado en la *Fig. 13* y es común dentro del proceso de conectorización ya que por lo general al cortar la fibra y volverla a unir a través de conectores no existe ninguna marca o guía que permita al operario hacer coincidir los extremos en la misma posición en la que se encontraban antes de cortar.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

En esta *sección* se describe el sistema experimental y el protocolo de medidas empleado para la obtención de la variación de potencia debida a este desalineamiento en fibras de múltiples núcleos, sólo o en combinación con otros tipos de desalineamientos.

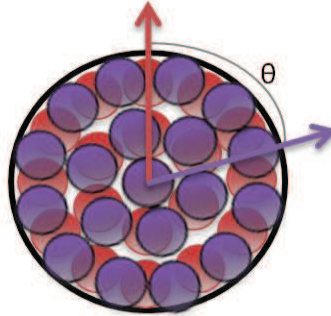


Figura 13. Desalineamiento rotacional en fibras de varios núcleos.

3.1.1 SISTEMA EXPERIMENTAL.

Partiendo de un sistema experimental automatizado desarrollado para medidas de pérdidas por desalineamiento transversal y longitudinal en fibras de un solo núcleo [12], hemos realizado el sistema de la *Fig. 14*. Este sistema se ha modificado para que además de variar la posición relativa de las fibras en la dirección del eje (longitudinal), y en su transversal, permita rotar una de ellas sobre dicho eje (desalineamiento rotacional). Este sistema se ha utilizado para caracterizar las pérdidas por desalineamiento en las fibras de múltiples núcleos, *EAA-MC* y *SMCK-1000*.

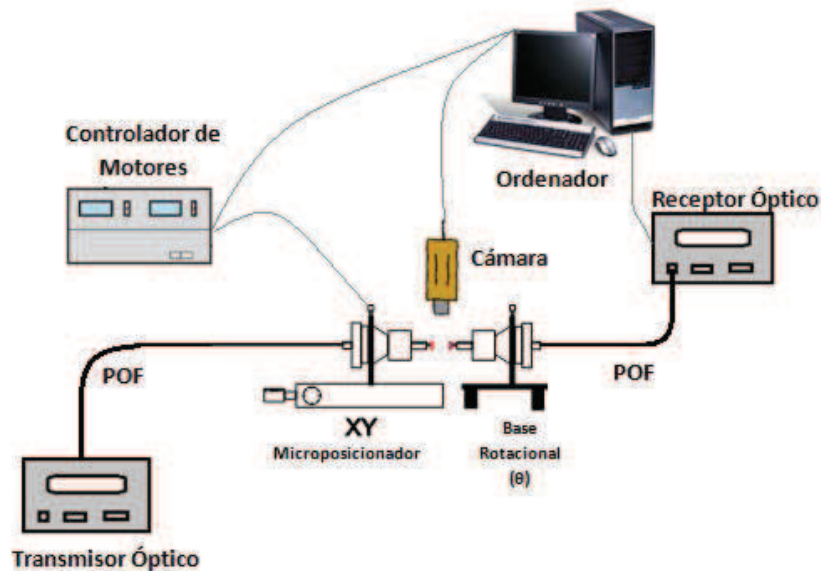


Figura 14. Sistema experimental para la medida de las pérdidas por desalineamientos.

El sistema utilizado consta de dos microposicionadores motorizados que permiten desplazar un extremo de la fibra con respecto a la otra fibra en los ejes *X* y *Z*. Los movimientos de los motores están controlados por un software *LabView^R* que se describe en el (*Anexo C. III* y *C. IV*). Una de las fibras enfrentadas se conecta por un extremo a un emisor *LED* de 665 nm *FOTEC* [23] mediante un conector *Versalink* (VL) [25] y por el otro, a la base con los

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

microposicionadores XY. A este extremo se enfrenta el del otro segmento de fibra que está montado sobre una base rotatoria perpendicular a su eje. Esta base rotatoria permite cambiar manualmente la posición relativa de las caras de las fibras, es decir, introducir un desalineamiento rotacional. El otro extremo de este segmento de fibra se conecta a un medidor de potencia PM100USB de Thorlabs [26] controlado por su propio software LabView^R (Anexo C. I) que permitirá analizar los resultados. Además de la ampliación del sistema para realizar desalineamiento rotacionales se ha introducido una cámara Dino-Lite [27], que lleva incorporado un espejo en un ángulo de 45°. Esta cámara permite visualizar la posición de las fibras desde dos puntos de vista y se utiliza para ayudar al alineamiento de los extremos de éstas con el fin de obtener un máximo de potencia y definir una posición que se utiliza como referencia. La Fig. 15 muestra 3 imágenes obtenidas con esta cámara e ilustra los posibles desalineamientos.

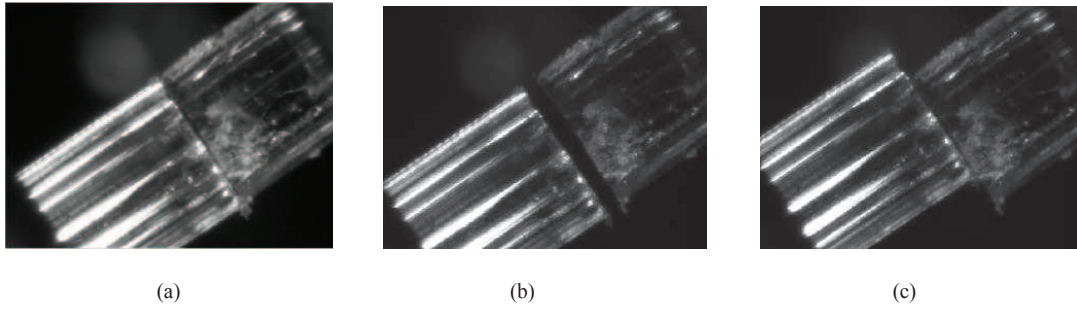


Figura.15. Tipos de desalineamientos posibles entre los extremos de la fibra.
(a) Ausencia de desalineamientos. (b) Desalineamiento Longitudinal. (c) Desalineamiento Transversal.

3.1.2 PROTOCOLO DE MEDIDAS.

El experimento comienza con los dos segmentos de fibra corta (0.72 cm a 1 m) cuyos extremos se instalan en los soportes correspondientes y en el emisor y detector respectivamente. Utilizando las imágenes proporcionadas por la cámara, los extremos enfrentados se alinean de manera óptima para proporcionar una potencia máxima y una posición de referencia $\{P(\theta = 0, x = 0, z = 0)\}$. Una vez alineadas las fibras, la potencia se mide cambiando las posiciones relativas de la fibra en uno o varios de los tres parámetros: θ (desalineamiento rotacional), x (desalineamiento transversal) y z (desalineación longitudinal): $\{P(\theta, x, z)\}$. La variación de la potencia se calcula como la potencia normalizada al valor de referencia que es el cociente de ambas medidas:

$$P(\theta, x, z) = \frac{P(\theta, x, z)}{P(\theta=0, x=0, z=0)} \quad [3.1]$$

3.2 DESALINEAMIENTO ROTACIONAL.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar un desalineamiento rotacional y se valoran sus efectos para fibras de múltiples núcleos. Para la terminación de la fibra SMCK-1000 hemos usado la cortadora C mientras que para la fibra EAA-MC se ha utilizado la cortadora A. En ambos casos se ha aplicado el proceso de pulido para garantizar las menores pérdidas posibles. Se han realizado varias medidas para cada tipo de fibra utilizando distintos segmentos en cada una de ellas para valorar la repetitividad de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

La Fig. 16 muestra potencia normalizada como una función del ángulo de rotación para las dos fibras testeadas. La potencia se mide para cada ángulo θ , de 0° a 360° cada 4° para $z = 0$ y $z = 70 \mu\text{m}$. La separación longitudinal se eligió para evitar la colisión de las fibras al girar una de ellas y es aproximadamente la distancia entre las fibras cuando se utilizan *conectores ST*. Aunque la simetría de fibra nos permite predecir la repetición periódica del mismo patrón cada 60° , hemos realizado toda la exploración con el fin de tener una idea de la influencia de factores tales como la inhomogeneidad en la distribución de potencia, las irregularidades de los núcleos o el factor de relleno que cuantifica los espacios entre los núcleos dentro de la fibra, formados por el mismo material de cubierta.

En la Fig. 16. (a) podemos ver como para la fibra *SMCK-1000* se pueden observar 12 máximos que corresponden al alineamiento de los núcleos exteriores. La variación entre los valores de los máximos y de los mínimos respectivamente no es muy elevada y pueden explicarse por la simetría de los distintos núcleos, pequeñas inhomogeneidades de la superficie, etc. La diferencia entre el valor obtenido para 0° y 360° cuando las fibras vuelven a la misma posición inicial es debida a que el emisor se va calentando a medida que avanza el proceso (cuya duración es de más de 1 hora) por lo que su potencia disminuye ligeramente.

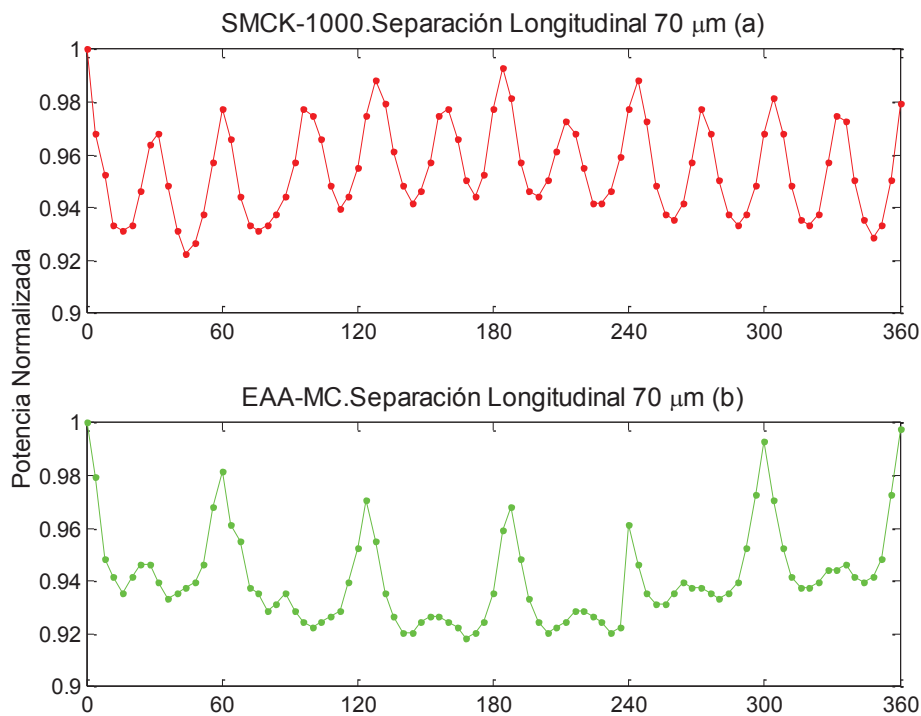


Figura 16. (a) Variación de potencia por desalineamiento rotacional para fibra *SMCK-1000* (Medidas experimentales).
(b) Variación de potencia por desalineamiento rotacional para fibra *EAA-MC* (Medidas experimentales).

Para la fibra *EAA-MC* en la Fig. 16. (b), se aprecian 6 máximos principales y 6 máximos intermedios de menor valor. Si observamos la Fig. 13 se aprecia que los núcleos exteriores son 12 mientras que en la capa más interior hay 6 núcleos. Cada 60° se produce un alineamiento de todos los núcleos (exteriores e interiores) mientras que cada 30° solo se alinean los exteriores. Para ambas fibras, la diferencia entre máximos y mínimos está en torno al 5.5%. Como experimento de control se ha medido la variación de potencia al rotar una fibra de un solo núcleo. En el caso de la fibra *EAA-SC*, de un solo núcleo obtenemos variaciones de potencia en torno al 1 % y siempre menores que el 2%, lo que confirma que las variaciones encontradas en

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

las fibras de múltiples núcleos son significativas. El diferente comportamiento de las dos fibras de múltiples núcleos puede tener varias explicaciones. Una de ellas, es la diferencia de apertura numérica de los núcleos individuales que sería menor en el caso de la *EAA-MC* por lo que cuando los núcleos de la capa intermedia están desalineados, aunque los extremos lo estén, la potencia captada por la segunda fibra es menor. Otro factor que podría explicar estas diferencias es el factor de relleno que viene definido por el tamaño real de los núcleos individuales y por sus irregularidades.

Durante el desarrollo de la serie de experimentos hemos podido observar que realizando diferentes cortes a la fibra, el máximo absoluto nunca repetía la misma posición, es decir, aquella posición que tenía la fibra antes de cortar. Esto no es extraño ya que la fibra está normalmente en una posición tensionada-estirada y al cortarla esta posición puede variar. Por ello si se desea controlar la posición relativa en el proceso de conectorización será necesario imprimir alguna marca en el recubrimiento de la fibra que permita orientar de nuevo la fibra a su posición original.

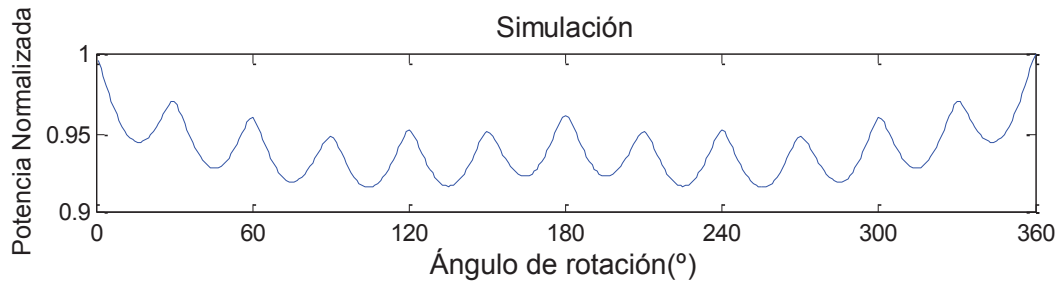


Figura 17. Variación de potencia por desalineamiento rotacional para fibra de múltiples núcleos (Simulación).

En la *Fig. 17* se han representado los resultados obtenidos realizando una simulación basada en el modelo de áreas que se ha utilizado tradicionalmente para predecir pérdidas por desalineamiento transversal, y que como vamos a ver, puede también aplicarse a las pérdidas por desalineamiento por rotación de la fibra [14]. Este modelo supone que toda la luz se distribuye uniformemente en el núcleo y que la luz transmitida de una fibra a otra es proporcional al área de solapamiento entre ambas fibras.



Figura 18. Imágenes de la sección transversal de las fibras de múltiples núcleos. (a) *EAA-MC*. (b) *SMCK-1000*.

Para obtener una predicción de estas pérdidas hemos inyectado luz por uno de los extremos de un segmento corto de fibra con el emisor *FOTEC*. La imagen del otro extremo se ha capturado con una cámara [27] para tener una imagen clara del patrón de campo cercano de la fibra.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

Las imágenes obtenidas para las fibras *EAA-MC* y *SMCK-1000* se muestran en la *Fig. 18*. Estas imágenes permiten apreciar que los núcleos de las fibras reales no son circulares, sino poligonales, debido al proceso de fabricación. Este hecho hace que el área que cubren los núcleos en las secciones transversales de las fibras, sea mayor que en el caso ideal de núcleos circulares (véase *Fig. 13*), lo que nos llevará, en la mayoría de los casos, a tener menores pérdidas por desalineamiento ya que dicha forma poligonal favorece una proximidad de los núcleos.

Basándonos en la imagen del patrón de campo cercano de la fibra *EAA-MC* se ha creado un programa en *Matlab* para el cálculo de la potencia transmitida en función del ángulo de rotación de la fibra (*Anexo C. V*). La máxima potencia transmitida se tiene cuando cada núcleo está enfrentado a su homólogo de la otra imagen. Después, la potencia transmitida en función del ángulo de rotación se calcula numéricamente como el área de solapamiento y la potencia normalizada se obtiene utilizando la *ecuación 3.1* de la misma forma que en el caso de las medidas.

Los resultados mostrados en la *Fig. 17* ilustran una variación igual a la obtenida en las medidas para la fibra *SMCK-1000* que es la esperada teniendo en cuenta la distribución de los núcleos dentro de la fibra, con máximos de potencia cada 30° que es cuando se produce coincidencia de los 12 núcleos exteriores (véase *Fig. 18*). Cada 15° se obtiene un mínimo de potencia, debido a que en estas posiciones no coinciden ni los núcleos del radio exterior ni los del radio interior.

En la *Fig. 16. (a)* podemos ver que para la fibra *SMCK-1000* tanto la variación como el valor absoluto de potencia con el ángulo de rotación son similares a la estimación basada en la simulación utilizando el modelo de áreas. De hecho los valores medidos son algo mayores que los estimados ya que entre las hipótesis de este modelo se ha asumido que los núcleos están muy próximos ($z = 0$) y que la potencia está distribuida sólo en el área de los núcleos sin extenderse debido a la apertura del haz radiado.

Para valorar los efectos de este desalineamiento como factor añadido a las pérdidas del conector, podemos estimar el rango de variación en las pérdidas en *dB* por desalineamiento rotacional. Utilizando los datos de la simulación mostrados en la *Fig. 17* estas pérdidas varían entre: 0.13 y 0.38 *dB* siendo el valor medio 0.25 *dB*. En el caso de la fibra *EAA-MC* el rango es: 0.08-0.37 *dB* con un valor medio de 0.22 *dB*. En la fibra *SMCK-1000* es de: 0.02-0.23 *dB* siendo su valor medio de 0.126 *dB*. El valor de las pérdidas obtenidas experimentalmente es del mismo orden aunque algo menores que los resultantes de la simulación. Una de las razones es que, en el caso de la simulación, se supone que no hay separación longitudinal entre las dos fibras mientras que en las medidas esta separación es de, al menos $70\ \mu\text{m}$. Como veremos, la separación longitudinal suaviza el efecto del resto de los desalineamientos. Teniendo todo esto en cuenta y que la diferencia entre las pérdidas medias del conector para fibras de un solo núcleo y las de múltiples núcleos es de 0.53 *dB* podemos considerar que el desalineamiento por rotación constituye una contribución importante en las mismas aunque es probable que no sea la única.

En un estudio publicado sobre pérdidas en fibras de múltiples núcleos [24] en el que se ha analizado la misma fibra *SMCK-1000* se obtienen valores de pérdidas por desalineamiento rotacional de 0.05-0.55 *dB*, similares aunque algo mayores a los obtenidos en nuestro trabajo

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

0.13-0.38 dB. En nuestro caso hemos realizado un barrido completo de 360° y hemos utilizado un paso de 4° , mientras que en el estudio de analizado [24] se realiza un barrido de $0-30^\circ$ con un paso de 5° , asumiendo que cada 60° se presenta simetría de valores.

La conclusión más importante de este experimento es que la variación de potencia causada por el desalineamiento rotacional es en media 0.25 dB y puede explicar en parte la diferencia entre las pérdidas de inserción de los conectores en fibras de uno y varios núcleos. De esta forma, habiendo determinado que la influencia del desalineamiento por rotación es significativa en las pérdidas globales de los conectores, impera conocer su variación cuando aparece combinado con otros desalineamientos y hacer un balance sobre los mismos.

3.3 INFLUENCIA DE LOS DESALINEAMIENTOS TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL.

En esta *sección* se abordan los desalineamientos transversal y longitudinal, y como afecta su combinación al desalineamiento rotacional. El objetivo es tener una caracterización completa de los desalineamientos en fibras de múltiples núcleos, para poder cuantificarlos y valorar su influencia en las pérdidas de conectorización.

3.3.1 DESALINEAMIENTO LONGITUDINAL.

El desalineamiento longitudinal se ha medido a partir de la posición en la que las fibras están lo más cerca posible sin llegar a estar en contacto ($z = 70 \mu m$) hasta 5 mm, escaneado en pasos de $50 \mu m$. La posición en los otros ejes es aquella para la cual se obtiene un máximo de potencia óptica transmitida y suponemos que es $\theta = 0^\circ$ y $x = 0 mm$.

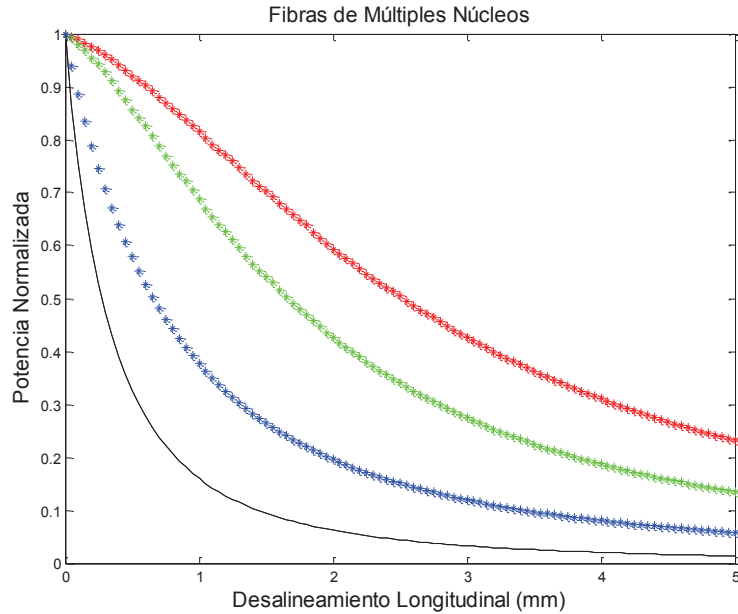


Figura. 19 Desalineamiento longitudinal fibra SMCK-1000 (rojo), fibra EAA-MC (verde) y modelo simple ($NA=0.6$ y $NA=0.3$).

En la *Fig. 19* se representan los resultados experimentales para las dos fibras de múltiples núcleos, puntos verdes para la fibra EAA-MC y en rojo para la fibra SMCK-1000 junto con una línea continua en negro que es la predicción de un modelo simple. Este modelo está basado en la expansión del haz de luz determinado por el NA de la fibra y la hipótesis de una distribución de

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

luz uniforme sobre el núcleo [14], de forma que la potencia transmitida de una fibra a otra viene dada por la siguiente *ecuación 3.2*:

$$L = \left(1 - \frac{a^2}{\left(a + \frac{z \cdot NA}{\sqrt{1 - NA^2}} \right)} \right) \quad [3.2]$$

a: Radio de la fibra.

NA: Apertura Numérica de la fibra.

z: Distancia entre los extremos de la fibra.

La *Fig. 19* muestra en primer lugar que la variación es diferente para ambos tipos de fibras. Esto se ha confirmado realizando varias medidas cambiando los segmentos de fibras utilizados. Por otra parte para este tipo de desalineamiento, el modelo es muy inexacto con unas predicciones muy por debajo de las medidas reales. En parte estas diferencias se le pueden atribuir a que en los cálculos se ha utilizado la *NA* nominal 0.6 sacada de las hojas de características que no corresponde a la apertura del haz de salida, ya que esta viene influenciada por distintos factores como son las condiciones de inyección, el acoplo modal, las curvaturas, etc. Incluso con una fuente de relativamente gran apertura como el *LED* de *FOTEC* que hemos utilizado, el acoplo de luz a la fibra se realiza principalmente a ángulos relativamente bajos y debido a que se utilizan segmentos cortos de la misma, no hay lugar para que se produzca suficiente transferencia de potencia a ángulos más altos.

En cualquier caso, las medidas de campo lejano obtenidas en el laboratorio para estas fibras nos dan valores de *NA* en torno a 0.3. Utilizando la *ecuación 3.2* con este valor de *NA* que se representa en la *Fig. 19*, como una continua azul, vemos que todavía queda por debajo de los resultados. En realidad, otra hipótesis de este modelo es que supone que la distribución angular de potencia óptica radiada por la fibra es uniforme y que no cambia con la distancia, lo cual está lejos de la realidad. Si tuviéramos en cuenta que la potencia óptica está más concentrada en ángulos bajos, se obtendrá una variación más próxima a los resultados experimentales. Además, las diferencias entre ambos tipos de fibras, seguramente, se podrían explicar teniendo en cuenta las diferencias en la distribución angular de la potencia radiada para cada tipo de fibra.

3.3.2 DESALINEAMIENTO TRANSVERSAL.

El desalineamiento transversal es por lo general el más restrictivo de los que se han analizado y puede aparecer en los conectores, no solo en su instalación, sino también debido a vibraciones que son frecuentes en algunos entornos de aplicación como coches o aviones. Para determinar la variación de potencia debida al desalineamiento transversal la posición relativa de las fibras se cambió de 3 mm a la izquierda hasta 3 mm a la derecha con un paso de 50 μm. La posición angular relativa de las fibras para esta medición se fijó en la posición en la que se obtuvo el máximo de potencia absoluta ($\theta = 0^\circ$) y la separación en el eje $z = 70 \mu m$. Su comportamiento se puede predecir con un gran acierto usando el modelo de áreas que depende principalmente del tamaño global del núcleo de la fibra [14] y viene dado por la siguiente *ecuación 3.3*:

$$L = \left(1 - \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{d}{2a} \right) - \left(\frac{d}{2a} \right) \left[1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} \right] \right) \quad [3.3]$$

a: Radio de la fibra. d: Distancia entre ejes de las fibras.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

La Fig. 20 representa los resultados experimentales para las dos fibras de múltiples núcleos y las predicciones del modelo de la misma forma que para el desalineamiento longitudinal. El modelo se ha aplicado suponiendo una distribución homogénea de potencia dentro del círculo de 1 mm sin tener en cuenta las variaciones debidas a la presencia de los 19 núcleos, como si se tratara de una fibra de un solo núcleo con el mismo tamaño, es decir, despreciando los efectos debidos a su estructura.

En la Fig. 20 podemos ver un excelente acuerdo de las predicciones del modelo con los datos experimentales. Se observa también que el desalineamientos transversal es mucho más crítico que el longitudinal y que cuando deja de haber solapamiento entre las fibras, no hay transferencia de potencia. Para este desalineamiento, no se observan diferencias significativas entre los dos tipos de fibras. Es interesante observar que la presencia de los múltiples núcleos no produce variaciones significativas en el desalineamiento transversal que sigue la misma dependencia que la que se obtienen para fibras de un solo núcleo [12], lo que confirma que es válida la simplificación asumida para aplicar este modelo.

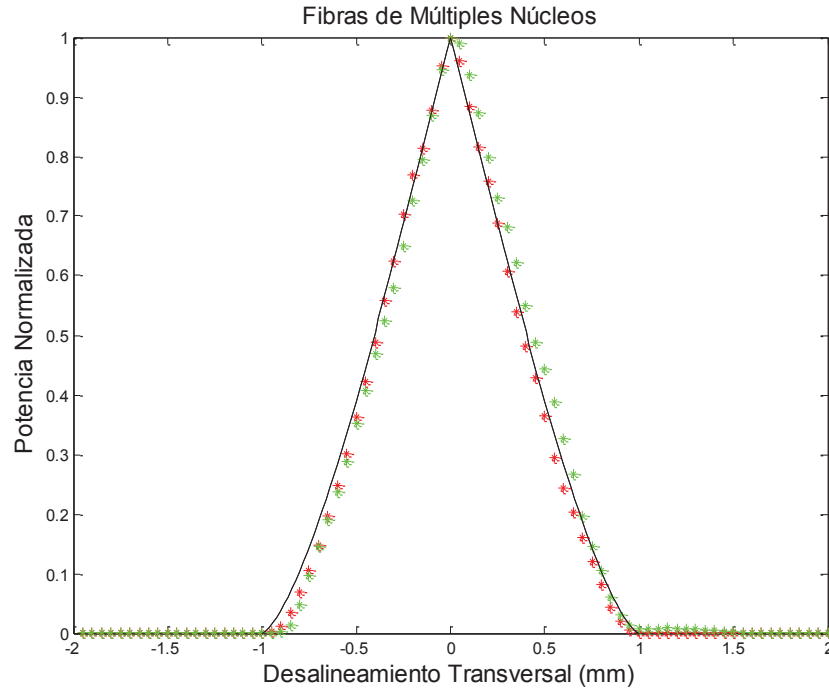


Figura. 20 Desalineamiento transversal fibra SMCK-1000 (rojo), fibra EAA-MC (verde) y modelo simple (negro).

3.3.3 COMBINACIÓN CON EL DESALINEAMIENTO ROTACIONAL.

En la Fig. 21 se presentan los resultados de combinar los desalineamientos rotacional y longitudinal. En dicha figura se ha representado la variación de potencia obtenida al realizar el barrido angular para dos separaciones de las fibras $z = 240 \mu m$ y $z = 70 \mu m$. Este último se ha representado en la Fig. 16 pero se incluye en esta figura para facilitar la comparación.

Se puede ver que, la variación de potencia por desalineamiento rotacional se suaviza a medida que la separación longitudinal aumenta. Esto se puede explicar cualitativamente teniendo en cuenta el efecto de la apertura del haz radiado por la fibra. De esta forma el haz que proviene de la fibra transmisora que ilumina una región de la fibra receptora, al incrementar la separación longitudinal se expande iluminando una región mayor que puede abarcar otros

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

núcleos, por lo que la potencia capturada por la segunda fibra es mayor. De esta forma, la posición relativa de los núcleos es menos relevante.

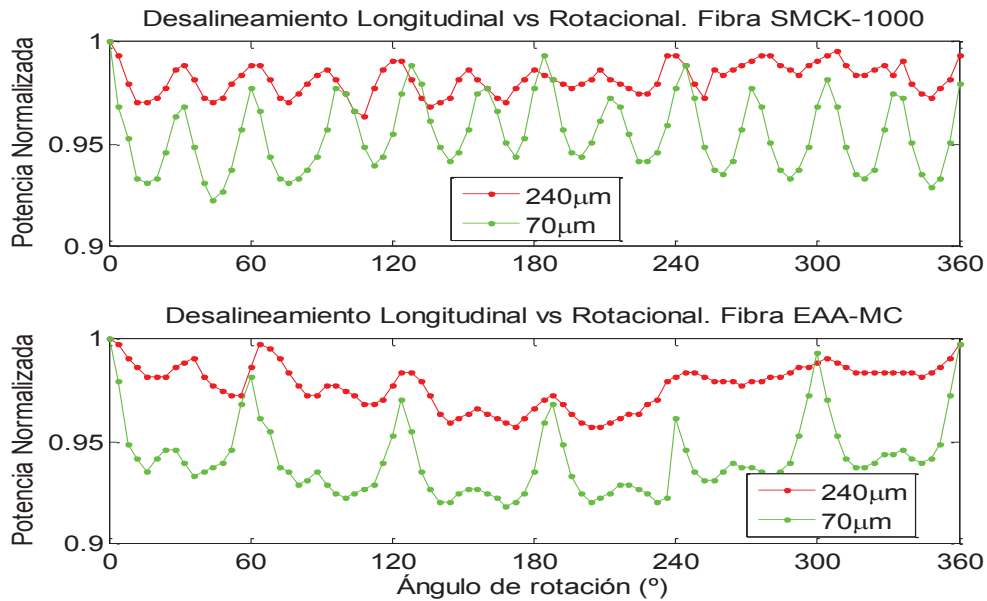


Figura. 21 Combinación de desalineamiento longitudinal y rotacional.
Fibra *SMCK-1000*. Fibra *EAA-MC*.

De manera análoga se ha obtenido la variación de potencia con la separación transversal para dos posiciones relativas de las fibras según el ángulo de rotación. La *Fig. 22* muestra la variación de la potencia cuando la posición angular de las fibras es la que produce un máximo (color rojo) y cuando es la que produce un mínimo (color verde) para ambas fibras testeadas.

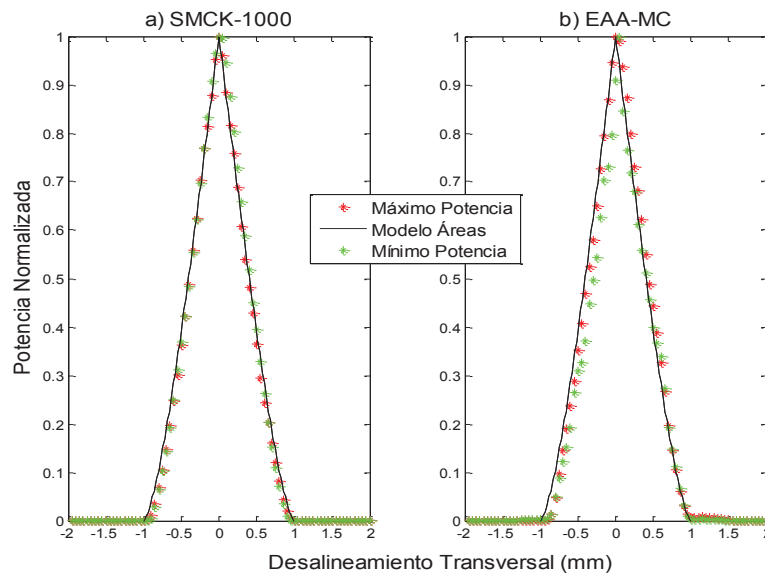


Figura. 22 Combinación de desalineamiento transversal y rotacional máximo (rojo), mínimo (verde) y modelo simple (negro). a) Fibra *SMCK-1000*. b) Fibra *EAA-MC*.

En la *Fig. 22* se observa que la variación en la dimensión transversal es la misma lo cual era de esperar ya que, como se ha comentado antes, el efecto de la inhomogeneidad en la distribución de potencia no afecta el desalineamiento transversal.

CAPÍTULO 3. DESALINEAMIENTOS ENTRE FIBRAS DE MÚLTIPLES NÚCLEOS.

3.3.4 COMBINACIÓN DE DESALINEAMIENTO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.

Para completar este estudio, se ha obtenido la variación de potencia en fibras de múltiples núcleos cuando se combinan los desalineamientos longitudinal y transversal. Se marcó como punto de partida el desalineamiento rotacional en aquel ángulo que nos ofrecía máxima potencia (0°), y se realizó un doble barrido con un paso de $50\ \mu\text{m}$ de 3 a $-3\ \text{mm}$ en la dirección transversal y de $0.70\ \mu\text{m}$ a $5\ \text{mm}$ en la dirección longitudinal.

La Fig. 23 muestra que cuando la separación longitudinal es pequeña, el desalineamiento transversal es el más crítico y que va suavizándose su influencia al separar las fibras debido al efecto de la apertura, igual que ocurre en el desalineamiento rotacional comentado antes. También vemos que tal y como mostraba la Fig. 19 la variación por desalineamiento longitudinal es más acusada para la fibra *EAA-MC* que para la fibra *SMCK-1000*. Estas diferencias se podrían justificar mediante la distribución angular de potencia radiada por cada tipo de fibra. Los valores de esta figura permiten obtener las pérdidas para la combinación de cualquier par de desalineamientos transversal y longitudinal, y se pueden incluir en un modelo completo de conector desarrollado para entornos de simulación y diseño de redes ópticas basadas en *POF*.

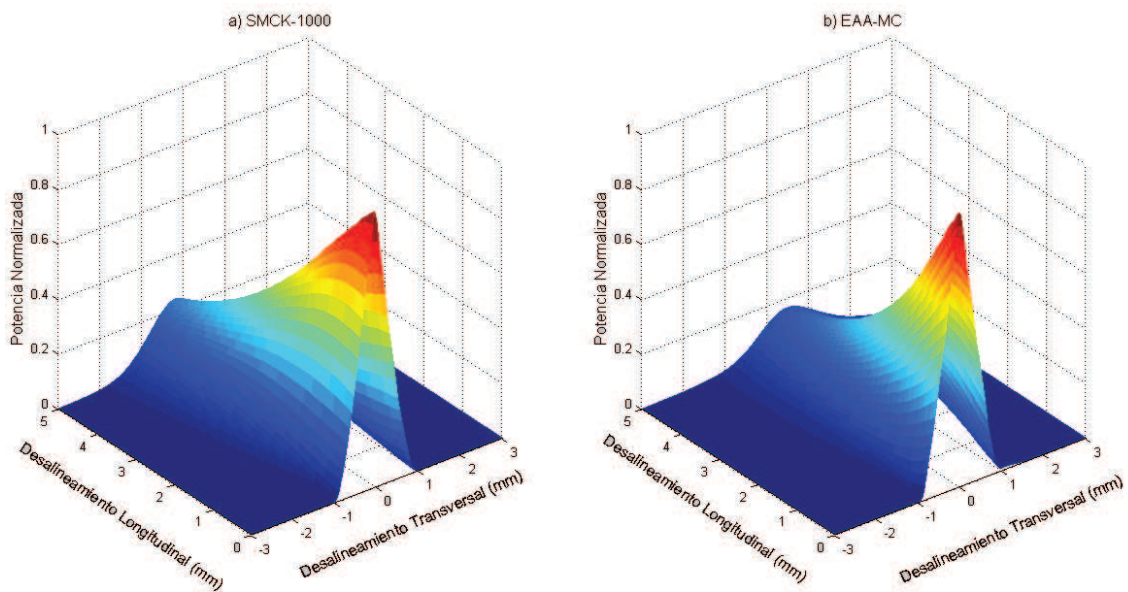


Figura. 23 Combinación de desalineamientos longitudinal y transversal.
a) Fibra *SMCK-1000*. b) Fibra *EAA-MC*.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.

El objetivo de este proyecto ha sido el análisis del proceso de conectorización de fibras de plástico de uno y múltiples núcleos, utilizando *conectores* de tipo *ST*. Dentro de este análisis, no sólo se han determinado experimentalmente las pérdidas de inserción del conector y su variabilidad, sino que se ha realizado un estudio de las herramientas de terminación que permitirá realizar una elección adecuada para cada tipo de fibra y además se han obtenido las pérdidas introducidas por los posibles desalineamientos que pueden darse durante el proceso de conectorización.

En la primera parte del proyecto se ha confirmado que la herramienta idónea es diferente para cada tipo de fibra y se ha determinado que la elección depende de factores como la dureza del material del recubrimiento, la estructura de la fibra, etc. De hecho, si no se aplica un proceso de pulido una vez insertado el conector, es fundamental elegir la cortadora adecuada para mantener las pérdidas en valores aceptables. Para ello se ha elaborado la *Tabla 2* que permite decidir cuál es la mejor cortadora para cada uno de los tipos de fibras analizados. Globalmente, la herramienta más versátil y que es capaz de dar buenos resultados con un mayor número de fibras es la *cortadora A* que, además de ser la que presenta menores pérdidas medias (1.6 dB) y menor variabilidad (0.36 dB), es la que tiene un comportamiento más estable, mejor facilidad de manipulación y una mayor durabilidad.

En cualquier caso, el proceso de pulido a dos lijas puede subsanar los efectos de un corte irregular, reduciendo no sólo las pérdidas sino también la variabilidad en los resultados obtenidos por las distintas cortadoras. De hecho, las pérdidas medias del conector sin pulido, 2.05 dB pueden reducirse hasta 0.95 dB con dicho proceso y la desviación estándar de 0.96 dB a 0.43 dB. Por otra parte, incluso si se va a aplicar el proceso de pulido, es recomendable el uso de una cortadora adecuada ya que, si se parte de un mal corte, el tiempo invertido en el proceso de pulido puede incrementar considerablemente la duración de la conectorización.

En la segunda parte del proyecto, se aborda el estudio completo de los desalineamientos que afectan a las fibras de múltiples núcleos haciendo especial énfasis en el desalineamiento rotacional que es exclusivo de este tipo de fibra, ya que consiste en la falta de alineamiento entre núcleos individuales debido a la rotación de las fibras en torno a su eje. Una de las motivaciones para abordar este estudio fue que se encontró que las pérdidas medias para la fibra de múltiples núcleos son significativamente mayores que las de un solo núcleo: 1.31 dB +/- 0.48 frente a 0.78 dB +/- 0.28 respectivamente. Para realizar las medidas de pérdidas por desalineamiento se actualizó un sistema experimental diseñado para medir desalineamientos en fibras de un solo núcleo, que incorpora la posibilidad de introducir el desalineamiento por rotación relativa entre fibras.

En esta parte, se concluye que el desalineamiento por rotación en las fibras de múltiples núcleos, sobre todo si aparece en combinación con otros desalineamientos, puede explicar las mayores pérdidas en la conexión de este tipo de fibras. Las pérdidas extras introducidas por el desalineamiento rotacional pueden ser de hasta 0.4 dB que es un porcentaje importante de las pérdidas totales del conector. Por ello, es recomendable que los fabricantes de fibras y conectores diseñen alguna marca o huella que permita a los operarios realizar un correcto alineamiento durante la inserción del conector para disminuir o evitar dichas pérdidas extras.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.

Además se determinó que el desalineamiento transversal es el que tiene mayor impacto en la cantidad de potencia transferida de una fibra a otra. En este proyecto, no se han encontrado diferencias entre sus efectos para fibras de uno o múltiples núcleos. En ambos casos, la potencia transferida depende del área de solapamiento entre las fibras enfrentadas sin que la estructura interna del núcleo global tenga influencia en dicha transferencia. Por ello, las pérdidas pueden modelarse mediante el modelo de áreas tradicional considerando un núcleo de 1 mm de diámetro tanto para fibras de uno como de múltiples núcleos. Este desalineamiento, aunque ya hemos dicho que es bastante importante de cara a las pérdidas, afecta menos en conectores ya que estos sujetan ambas fibras sin dejar suficiente holgura como para permitir grandes desviaciones en su posición transversal.

Por último, se ha determinado que la separación longitudinal entre fibras suaviza los efectos de los otros desalineamientos. Este tipo de desalineamiento es el más frecuente en conectores ya que aparece de forma fortuita (si la fibra se corta demasiado, por ejemplo) o de forma intencionada (conectores de *air-gap*). Además, hemos visto que su variación es diferente para distintos tipos de fibras, lo cual puede explicarse mediante diferencias en la distribución espacial de potencia radiada por las mismas. Esta distribución depende de numerosos factores como son la distribución de potencia inyectada, la longitud de fibra por la que se transmite, el acoplo modal de la fibra, las curvaturas y otras perturbaciones que provoquen transferencia de potencia entre ángulos, etc. Por ello, es importante postular un modelo que sea capaz de integrar todos estos efectos para cuantificar las pérdidas producidas por este desalineamiento.

4.1 CONTINUIDAD Y FUTURO DEL PROYECTO.

Este proyecto presenta una base sólida sobre el estudio de las pérdidas en los conectores en fibra *POF* ya que puede servir de guía de operaciones para futuros estudios sobre fibra de plástico puesto que define el procedimiento a seguir para conectorizar dos extremos de fibra de cualquiera de los tipos analizados. Aunque se han caracterizado las pérdidas globales en los conectores, sería interesante tener también una medida de cómo afectan a la distribución angular de potencia que se propaga por la fibra. De hecho, esta metodología de conectorización y obtención de pérdidas de inserción servirá como base en el futuro para realizar una caracterización más completa del conector basada en medidas experimentales de imágenes del patrón del campo lejano y en la que los efectos del conector sobre la potencia óptica se modelan mediante matrices. Esta caracterización mediante matrices, tanto de la propagación de luz por la fibra como de los efectos introducidos por otros dispositivos, es necesaria para completar un modelo de fibra de plástico y componentes que está desarrollando el grupo de *POF* de la *Universidad de Zaragoza* y en cuya integración en entornos de simulación de redes ópticas está colaborando con el grupo de *CUNY*. El método de caracterización está basado en la medida del campo lejano para distintos ángulos de inyección realizado con y sin conector y permite extraer los efectos de éste sobre la distribución de potencia óptica. Aunque ya se obtuvo la caracterización de conectores de fibra de un solo núcleo, ésta se realizó sin aplicar el procedimiento óptimo de preparación por lo que sería conveniente realizarla de nuevo. Además, los conectores para fibras de múltiples núcleos no se han caracterizado hasta el momento.

Por otra parte se han medido experimentalmente los posibles desalineamientos entre fibra y se ha discutido su influencia dentro del proceso de conectorización. No obstante, los modelos utilizados para predecir las pérdidas por desalineamiento no dan un buen acuerdo con los resultados experimentales, particularmente en el caso del desalineamiento longitudinal. Tampoco se tiene un modelo que permita explicar cuantitativamente las diferencias del

comportamiento de las distintas fibras. Por ello sería conveniente postular un nuevo modelo matemático que tenga en cuenta la distribución de potencia a la salida de la fibra y su variación con las coordenadas espaciales de forma que se pueda adaptar a los distintos tipos de fibras y a las distintas condiciones. De igual manera, se considera necesario continuar el proceso de automatización del sistema experimental de medidas de desalineamientos (la medida del desalineamiento rotacional se realizaba de forma manual) y ampliarlo al desalineamiento angular (inclinación o ángulo entre las caras de las fibras). De hecho, a la fecha de la conclusión de esta memoria se está trabajando en el diseño y montaje del mismo de cara a un trabajo futuro.

4.2 VALORACIÓN DEL TRABAJO.

Primeramente este trabajo tenía como base obtener las pérdidas en conectores para fibras de múltiples núcleos y mejorar estudios previos sobre herramientas de terminación determinando la influencia de las mismas en la unión entre fibras *POF*. Como aspecto añadido, se profundizó en posibles desalineamientos que pueden aparecer en la conectorización de fibras de múltiples núcleos y en su influencia en las pérdidas globales. Al comienzo de este proyecto se realizó un estudio a fondo sobre las características de la fibra de plástico apoyado principalmente por las asignaturas de *Comunicaciones Ópticas* y *Laboratorio de Comunicaciones Ópticas* y se tuvieron en cuenta además proyectos de fin de carrera anteriores sobre temática similar.

Una vez recopilada y asimilada la información, se procedió al análisis exhaustivo de las herramientas de terminación y a su caracterización respecto a todos los aspectos necesarios. Simultáneamente, se fueron obteniendo las pérdidas de inserción para diferentes fibras y se diseñó un protocolo experimental que apoyara la obtención de las pérdidas de inserción en los conectores.

Al observar experimentalmente que las pérdidas en dichos conectores podrían depender de otros factores aparte de la terminación del extremo, se procedió a determinar la influencia de los posibles desalineamientos en dichas uniones. Esto llevó a la modificación de un montaje experimental para la medida de las pérdidas debidas a todos los posibles desalineamientos que pueden ocurrir en la conectorización de fibras de múltiples núcleos. El siguiente paso fue analizar y procesar todos los datos y cálculos obtenidos en los experimentos realizados y llegar a las conclusiones que se han resumido al final de la memoria de este proyecto.

Una vez cumplidos todos los objetivos planteados al comienzo de este proyecto y analizados los resultados obtenidos, se considera que el desempeño ha sido correcto y los resultados han sido satisfactorios. El estudio presentado en este trabajo ha dado pie a la creación de dos artículos (*Anexo D*) que se presentarán en la “16th INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS” y en el “XXIX SIMPOSIUM NACIONAL DE LA UNIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE RADIO”

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- [1] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Zubia. "Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibres". *Optics Express*, s. l: 20, 2006, Vol. 14, págs. 9028-9035.
- [2] J. Mateo, M. A. Losada, I. Garcés, J. Zubia. "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation". *Optics Express*, s. l: 4, 2009, Vol. 17, págs. 2850-2860.
- [3] J. Mateo, M. A. Losada, A. López. "Matrix method to solve the differential power flow equation in the frequency domain". *12th Intl. Conf. on Transparent Optical Networks*. Munich, Germany, July 2010.
- [4] M. A. Losada, J. Mateo, J. J. Martínez- Muro. "Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model ". *IOP Journal of Optics*, 2011, Vol. 13, no.5.
- [5] J. Mateo, A. Oca, M. A. Losada, J. Zubia. "Domestic multimedia networks based on POF". *17th Intl. Conf. on Plastic Optic Fibres and Applications*. Santa Clara, USA, 2008.
- [6] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos, "Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System" *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 3, 468-475.
- [7] N. Antoniadis, M. A. Losada, J. Mateo, D. Richards, T. K. Truong, X. Jiang, M. Madamopoulos. "Modeling and characterization of SI-POF and connectors for use in an avionic system". *20th Intl. Conf. on Plastic Optical Fibres and Applications*. Bilbao, Spain s.n., 2011.
- [8] M. A. Losada and J. Mateo, "Short range (in-building) systems and networks: A chance for plastic optical fibers", chapter 7 of edited book by N. Antoniadis, G. Ellinas, and I. Roudas, (Eds.), "*WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering*", Dec 2011, Springer Inc.
- [9] Amanda Esteban Sánchez, "*Análisis de los efectos de conectores sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico*". Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Telecomunicaciones Zaragoza, 2011.
- [10] A. Esteban, M. A. Losada, J. Mateo, N. Antoniadis, A. Lopez, and J. Zubia, "Effects of Connectors in SI-POFs Transmission Properties Studied in a Matrix Propagation Framework", *Proc. of International Conference on Plastic Optical Fiber (ICPOF 2011)*, paper D-2, September 2011, Bilbao Spain.
- [11] E. Grivas, D. Syvridis, G. Friedrich, "Influence of connectors on the performance of a VCSEL-Based standard Step-Index POF link", *IEEE Photonics Technology Letters*, December, 2009, Vol. 21.
- [12] J. Mateo, M. A. Losada, N. Antoniadis, D. Richards, A. López, J. Zubia. "Connector misalignment matrix model". *In Proceedings of 21th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers*, 2012.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- [13] *Connector, ST Connector POF 1 mm*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=105&cat=pof> (Accessed: 12 October 2013)
- [14] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum." *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems* ". ed. 2nd. s.l. : Springer, 2008.
- [15] *Fiber Cutter*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=110&cat=cutting> (Accessed: 5 November 2013)
- [16] *Disposable Fiber Cutter*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=120&cat=cutting> (Accessed: 15 October 2013)
- [17] *POF Cutter Block*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=105> (Accessed: 1 October 2013)
- [18] *Micro-Strip™ Stripping Tool*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=330&cat=stripping> (Accessed: 5 October 2013)
- [19] *Frasmotor Kress 530 FM* Available at: http://www.kress-elektrik.com/Elektrowerkzeuge_71+M5a1001ef150.0.html?&tx_commerce_pi1%5BcatUid%5D=17&tx_commerce_pi1%5BshowUid%5D=35 (Accessed: 10 October 2013)
- [20] *Fiber Polishing Kit*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=10&cat=kits> (Accessed: 25 October 2013)
- [21] *Slurry, Polishing*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=450&cat=polishing> (Accessed: 25 October 2013)
- [22] *Puck, Polishing Plastic ST*, Available at: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=409&cat=polishing> (Accessed: 25 October 2013)
- [23] *Fotec T570* Available at: <http://www.navicpmart.com/advice/advicetmp.cfm/s/ECCD83451F913030E040000A6F1439F1491545165/v/001~...%2Fsearch%2Farchivespec.cfm~CABLFO~FOTEC~T570~%20~%20|1~.html> (Accessed: 10 September 2013)
- [24] A. Berganza, G. Aldabaldetrekú, J. Zubia, G. Durana, and J. Arrue, "Misalignment Losses in Step-Index Multicore Plastic Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, V. 31, No. 13, 2013
- [25] *VersaLink POF* Available at: http://www.avagotech.com/pages/en/fiber_optics/eval_kits_accessories/connectors/hfbr-4531/?WT.mc_id=SupplyFrameSEP&utm_source=supplyFrame&utm_medium=SEP (Accessed: 12 March 2014).
- [26] *USB Power and Energy Meter Interface* Available at: <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=PM100USB> (Accessed: 31 March 2014).
- [27] *Dino-Lite Digital Microscope* Available at: <http://www.dino-lite.com/> (Accessed: 15 March 2014).



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN CONECTORES PARA FIBRAS DE PLÁSTICO.

ANEXOS.



Departamento de
Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad Zaragoza

ANEXO I: LA FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO. 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, en este proyecto nos vamos a restringir a las fibras de perfil de salto de índice (*SI-POF*), de 1 mm de diámetro y de núcleo de *polimetil-metacrilato (PMMA)* por lo que este anexo se va a enfocar hacia fibras de este tipo. La atenuación de las fibras de plástico así como su dispersión modal es mucho mayor que las que presentan las fibras de vidrio, lo que restringe su aplicación a longitudes de enlace relativamente cortas (LAN, redes domésticas, etc.) En contrapartida, su gran tamaño y apertura facilita el acoplo de luz que puede hacerse con fuentes ópticas de coste muy bajo. Tienen, además, la ventaja de presentar sus ventanas de atenuación en la región del visible.

En este anexo se va a presentar una introducción a este tipo de fibras, describiendo sus características geométricas así como su atenuación y su dispersión que son los parámetros que más nos interesan desde el punto de vista de las comunicaciones, ya que limitan la máxima longitud del enlace.

La fibra óptica de plástico constituye un medio de transmisión basado en reflexión total formado por un núcleo y una cubierta de materiales poliméricos, por lo general utiliza *PMMA* como núcleo y una resina como cubierta, a diferencia de las fibras de vidrio, el 96 % de la sección transversal es el núcleo.

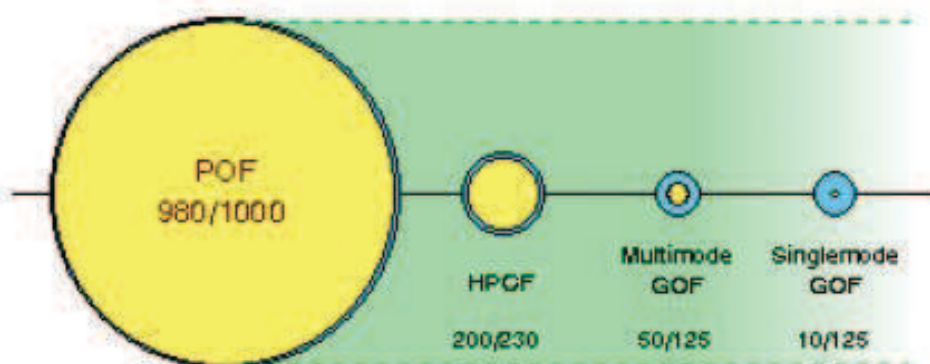


Figura. I Ilustración de la sección transversal de la *POF*.

A parte de las características que hemos comentado sobre la *POF*, para describir a esta 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.

A. I MATERIALES USADOS EN LA FIBRA DE PLÁSTICO.

Como hemos dicho el material del núcleo será una de las características fundamentales de la *POF*, podemos encontrar fibras de materiales de núcleo de *PC* policarbonato (mejores propiedades térmicas, hasta 145 °C pero mayor atenuación 800dB/km en 770 nm), *polímeros*deuterinados* (sustitución del hidrogeno por deuterio**) minimiza la absorción debido al hidrogeno (20 dB/km a 680nm) absorben vapor de agua, *polímeros fluorados* (mejor comportamiento *CYTOP* (cyclic transparent optical polymer). El material más usado *PMMA* *polimetil-metacrilato* (*plexiglas*). La Fig. II muestra la estructura del monómero y de su polímero.

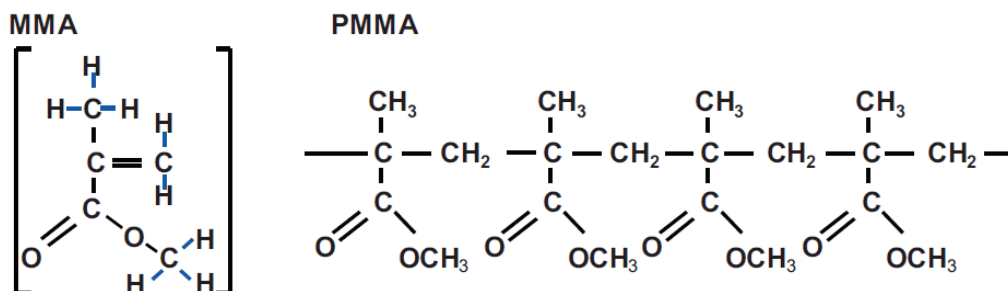


Figura. II Estructura molecular del PMMA.

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 10⁵. 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/cm³. Su resistencia a la tracción es aproximadamente 7 – 8 kN/cm². 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 recubrimiento protector o jacket también es importante pues 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 nuestro caso, el jacket de todas nuestras fibras es de polietileno. Podemos observar en la *Tabla. I* distintos materiales de fabricación empleados en la cubierta.

* Los polímeros (del Griego: poly: muchos y mero: parte, segmento) son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. Un monómero (del griego mono, 'uno', y meros, 'parte') es una molécula de pequeña masa molecular que unida a otros monómeros, a veces cientos o miles, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, forman macromoléculas llamadas polímeros.

** El deuterio (del griego Δεύτερος segundo), cuyo símbolo es ²H, es un isótopo estable del hidrógeno que se encuentra en la naturaleza con una abundancia del 0,015% átomos de hidrógeno (uno de cada 6500). El núcleo del deuterio está formado por un protón y un neutrón (el hidrógeno tiene solamente un protón). Cuando el isótopo pierde su electrón el ion resultante recibe el nombre de deuterón.

Short Name	Material	VDE-label	Allowed Continuous Operation Temperature	Thermal Overload Capacity	
				240 h	20 h
PVC	polyvinylchloride	Y	70°C	80°C	100°C
PVC 90°	polyvinylchloride 90°C	Y	90°C	100°C	120°C
PVC flame ret.	polyvinylchloride flame retardant	Y	70°C	80°C	100°C
PE LD; MD	polyethylene (low, medium density)	2Y	70°C	100°C	100°C
PE flame ret.	polyethylene flame retardant /with halogen	2Y	70°C	100°C	100°C
PE HD	polyethylene (high density)	2Y	80°C	110°C	120°C
PP	polypropylene	9Y	90°C	110°C	130°C
PA-6	polyamide - 6	4Y	80-90°C	120°C	150°C
PUR	polyurethane (thermoplastic)	11Y	90-100°C	120°C	140°C
VPE	cross linked polyethylene	2X	90°C	140°C	160°C
EVA	ethylene-vinylacetate-copolymere	4G	120°C	160°C	180°C
FEP	perfluorethylenpropylene	6Y	180°C	230°C	240°C
PTFE	polytetrafluorethylene	5Y	260°C	300°C	310°C

Tabla. I Materiales de fabricación de recubrimientos.

A. II 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 de la cubierta o 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.

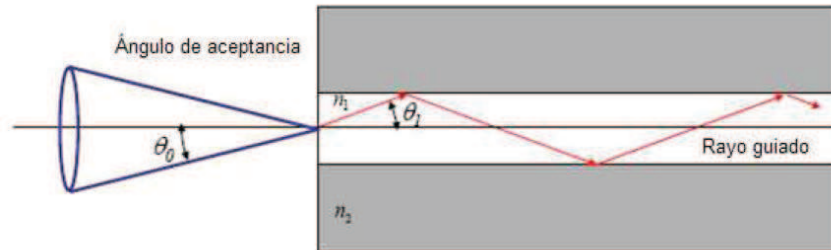


Figura. III Propagación de las ondas en el interior de la fibra óptica.

En la Fig. III 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 de la cubierta, que determinan la NA y que cumple la siguiente relación:

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

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

$$\theta_0 = \text{sen}^{-1}(NA) \quad [A.2]$$

La NA típica de la *POF* es grande, tendiendo normalmente de 0.46 a 0.50. Una NA grande favorece el acoplamiento de la luz, pero va en detrimento del ancho de banda de la fibra, 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*.

El valor del diámetro en fibra de plástico oscila entre 0.12 mm y 1mm. El tamaño del núcleo de la *POF* y su alta *NA* son las ventajas más importantes de las fibras de plástico frente a otros tipos de fibras.

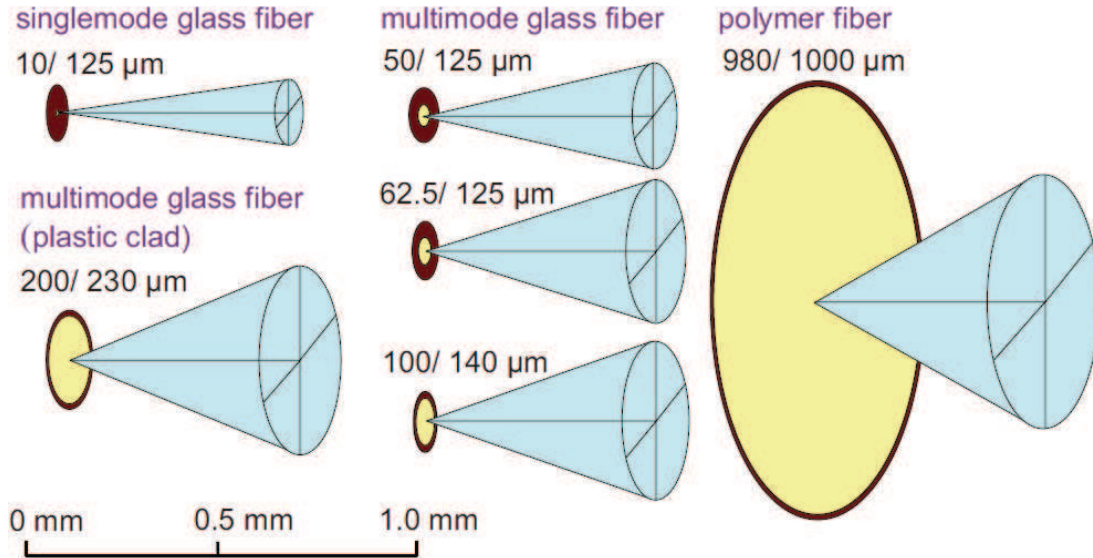


Figura. IV Comparación de NA y diámetro de distintas fibras ópticas.

Debido a las características que presentan (*tamaño de núcleo y NA*) en una *POF* se propagan un gran número de modos $>10^6$, por lo que puede considerarse como un continuo de ángulos que, además, debido a la fuerte difusión material presentan un fuerte acoplo modal, es decir, una alta transferencia de potencia entre modos.

También se diseñan fibras con diferentes perfiles como el de doble escalón (*DSI, double-step index*), las de múltiple-salto (*multi-step index, MSI*) y las de *índice gradual (GI)* con el objetivo de mejorar el ancho de banda.

Por otro lado tenemos además las fibras de múltiples núcleos las cuales como podemos observar en la *Fig. V* presentan una serie de núcleos en su interior por los cuales se propaga la luz. Esta fibra mantiene las características de la fibra de un núcleo antes vista como alta atenuación y gran acoplo modal, pero en su caso presenta un acoplo mayor que las fibras de un solo núcleo de ahí que presente bajas pérdidas en curvaturas.

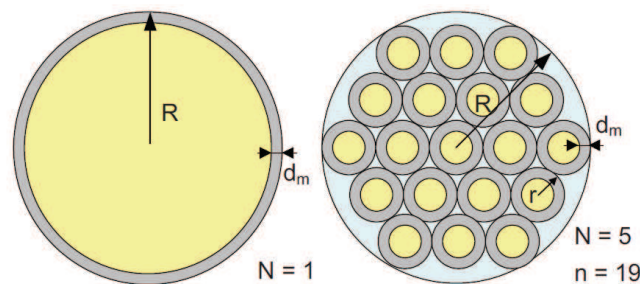


Figura. V Fibra de plástico de múltiples núcleos (19).

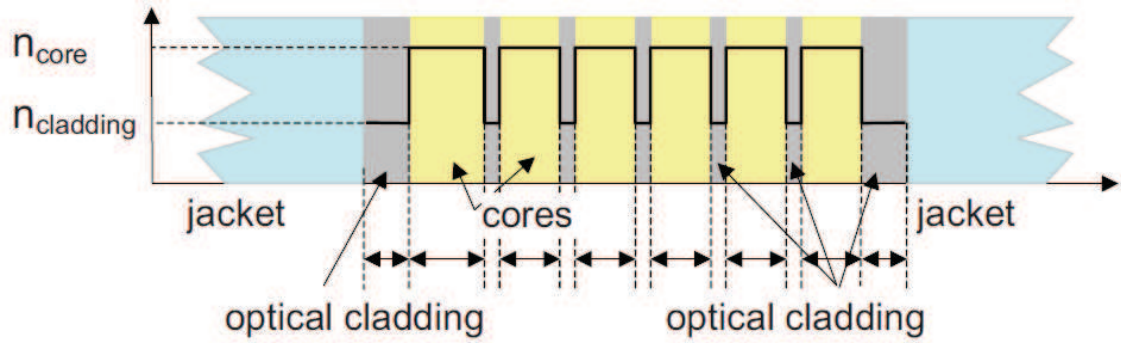


Figura. VI Fibra de plástico de múltiples núcleos SI (Salto de índice).

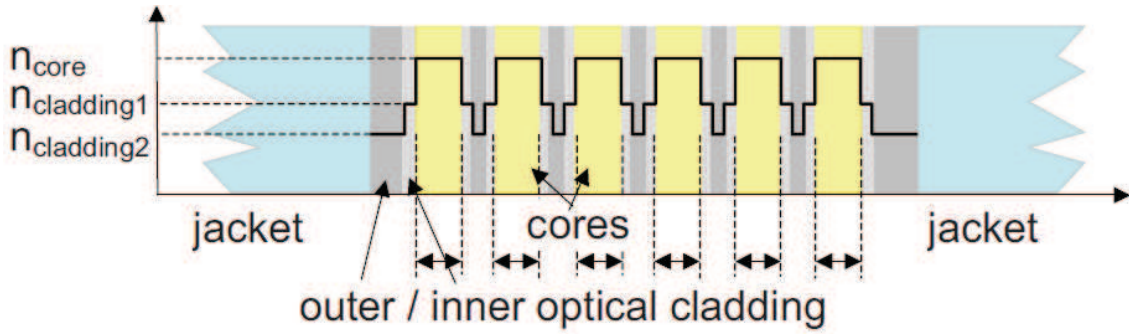


Figura. VII Fibra de plástico de múltiples núcleos DSI (Doble Salto de índice).

A. III 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 o difusión 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:

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

Donde P_e y P_s son las potencias de entrada y de 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.

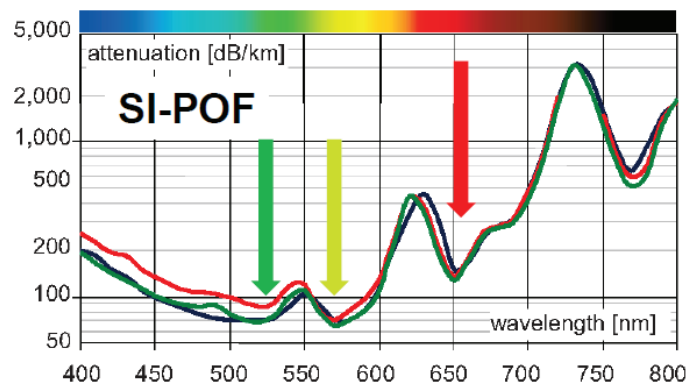


Figura. VIII Curvas de atenuación de SI-POF.

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. En las fibras de vidrio predomina el scattering *Rayleigh* que 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. En el caso de las fibras de plástico, el scattering dominante es el llamado scattering *Mie* y se produce por choques con partículas de mayor tamaño que el *Rayleigh*. En general, la difusión en las fibras de *PMMA* es mucho mayor que en las de vidrio y, además de pérdidas de potencia, da lugar a un fuerte acoplo modal que generalmente tiene como consecuencia una reducción del ancho de banda.
- *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 las fibras de vidrio las *POFs* son más resistentes, por lo que son más difíciles de romper en su manipulación. Además presentan unas pérdidas por curvaturas muy bajas, particularmente las fibras de múltiples núcleos.

En la *Fig. IX* 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.

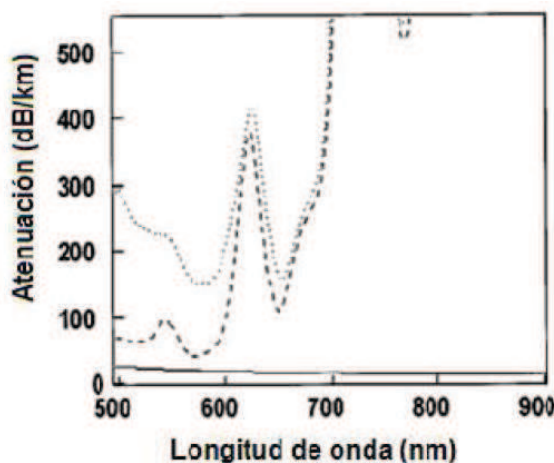


Figura. IX Espectros de atenuación de distintos tipos de *PMMA-POF*: *SI* (líneas discontinuas), *GI* (puntos discontinuos).

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). En 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. La atenuación depende de la apertura numérica de la luz inyectada ya que es diferente para los distintos modos (ángulos). 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 .

A. IV DISPERSIÓN Y ANCHO DE BANDA.

La velocidad de transmisión viene limitada por la dispersión que está causada por las características dispersivas de la fibra, lo que provoca ensanchamiento de los pulsos a medida que se propagan y, en consecuencia, deformación de los mismos, acarreando errores que, en definitiva, provocan fallos en recepción. Existen fundamentalmente dos tipos de dispersión que afectan a la *POF*: la dispersión material, debida a la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda y la dispersión intermodal, propias de las fibras de múltiples modos. Este segundo tipo es el que predomina en las fibras de plástico de *PMMA*, debido al gran número de modos que se propagan por ellas.

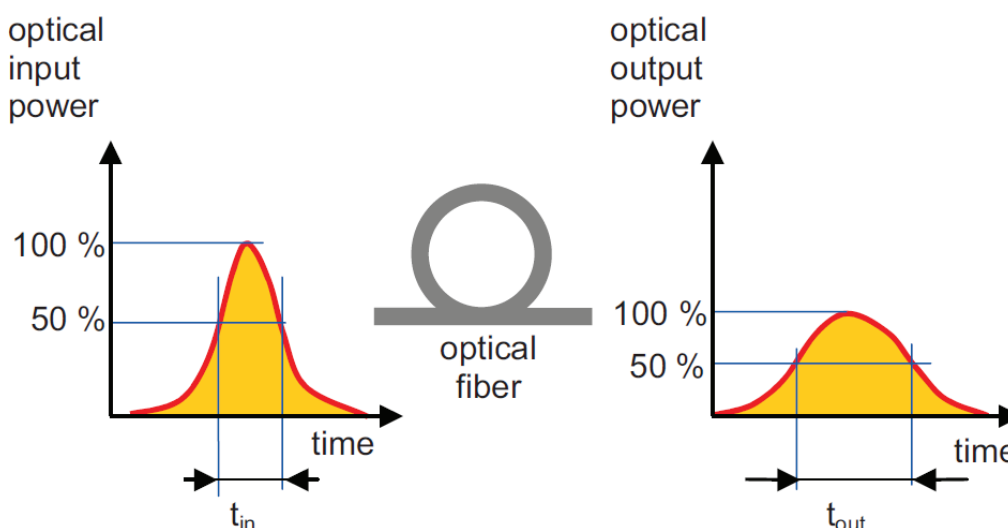


Figura. X Efecto dispersión.

- *Dispersión material*: Debido a que la anchura espectral del emisor no es nula y que a cada longitud de onda le corresponde una velocidad de propagación, se producirá un ensanchamiento de los pulsos que será proporcional a la distancia de propagación. Aunque con *SI-POF* se utilizan fuentes de gran anchura espectral, como *LEDs*, este tipo de dispersión es despreciable frente a la intermodal que es el predominante en fibras de perfil de salto de índice. Por otra parte, en fibras de índice gradual, con baja dispersión modal, la dispersión cromática puede ser importante.
- *Dispersión intermodal*: Tiene su origen en las distintas velocidades de propagación de los distintos modos (direcciones o ángulos de propagación). Dos rayos de igual longitud de onda que incidan simultáneamente pero con direcciones distintas llegarán en instantes diferentes al extremo receptor. Esto viene agravado por el hecho de que las fuentes utilizadas suelen ser de gran apertura e inyectan luz en la mayor parte de los modos. Además, debido al fuerte acoplo modal (transferencia de energía de unos modos a otros) la potencia puede cambiar de dirección durante su propagación lo que hace más complicado un estudio de esta limitación

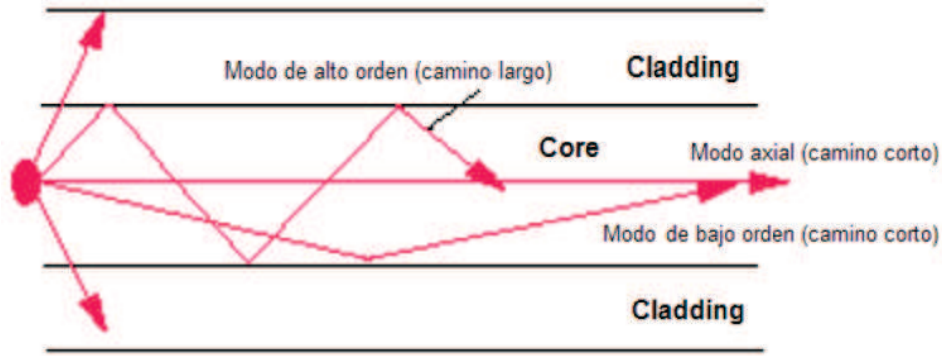


Figura. XI Diferencia de caminos de rayos en *SI-POF*.

En la *Fig. XI* se observan las diferentes direcciones que pueden tomar las ondas según el ángulo con el que incidan sobre el cladding (cubierta). Para reducir 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 (*Fig. XI*) permitiendo tasas de *Gbps* en las mismas distancias.

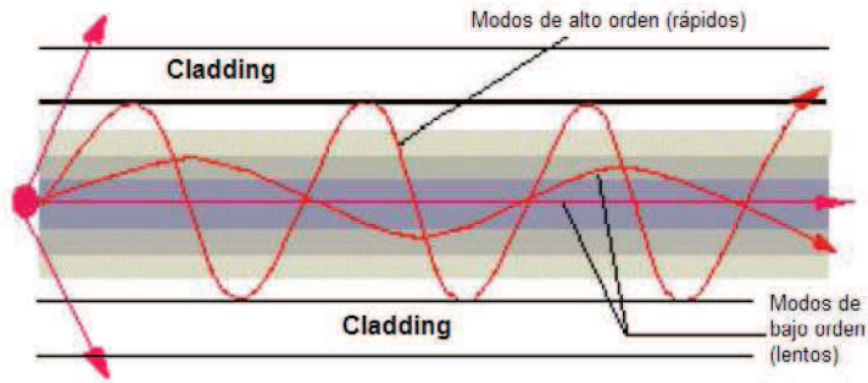


Figura. XII Diferencia de caminos de rayos en *GI-POF*.

La fibra como sistema lineal se puede describir como un filtro paso bajo. Su ancho de banda se puede describir de distintas formas. El ancho de banda de la fibra como sistema indica el rango de frecuencias de un sistema para el que la transmisión de señales se realiza con una atenuación razonable. La definición más habitual es la que describe la *Fig. XIII* que es el ancho de banda a $3dB$. Así f_{3dB} es la frecuencia a la cual la amplitud de una señal sinusoidal modulada monocromáticamente es reducida a $1/2$ del nivel óptico.

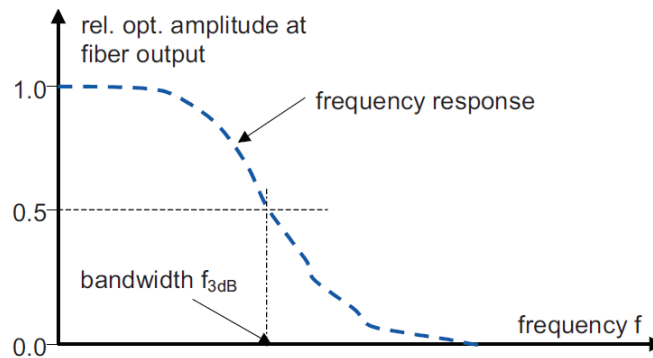


Figura. XIII Definición de ancho de banda.

ANEXOS.

ANEXO B: HERRAMIENTAS, FIBRAS Y CONECTORES.

En este anexo se incluyen las hojas de características de las fibras empleadas, de los conectores así como las de los principales instrumentos utilizados en el sistema de medidas.

B. I FIBRAS.

B. I. I FIBRA ESKA MITSUBISHI, GH-4001.

ESKA™ High-performance Plastic Optical Fiber: GK-40				
Manufactured by Mitsubishi Rayon Co., Ltd.				
Marketed and sold by Mitsubishi International Corporation				
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	Typical		
Core Diameter	μm	980		
Overall Diameter	μm	1000		
Fiber Diameter Tolerance	± 0%			
Applications: Sensing				
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.				
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	[50nm collimated light (standard conditions) [10m – 1m outback]	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

Figura. XIV Hoja de datos de la fibra Eska Mitsubishi, GH-4001.

ESKATM Plastic Fiber Optic & Cable General Technical Information
 Manufactured by Mitsubishi Rayon Co., Ltd.
 Marketed and sold by Mitsubishi International Corporation

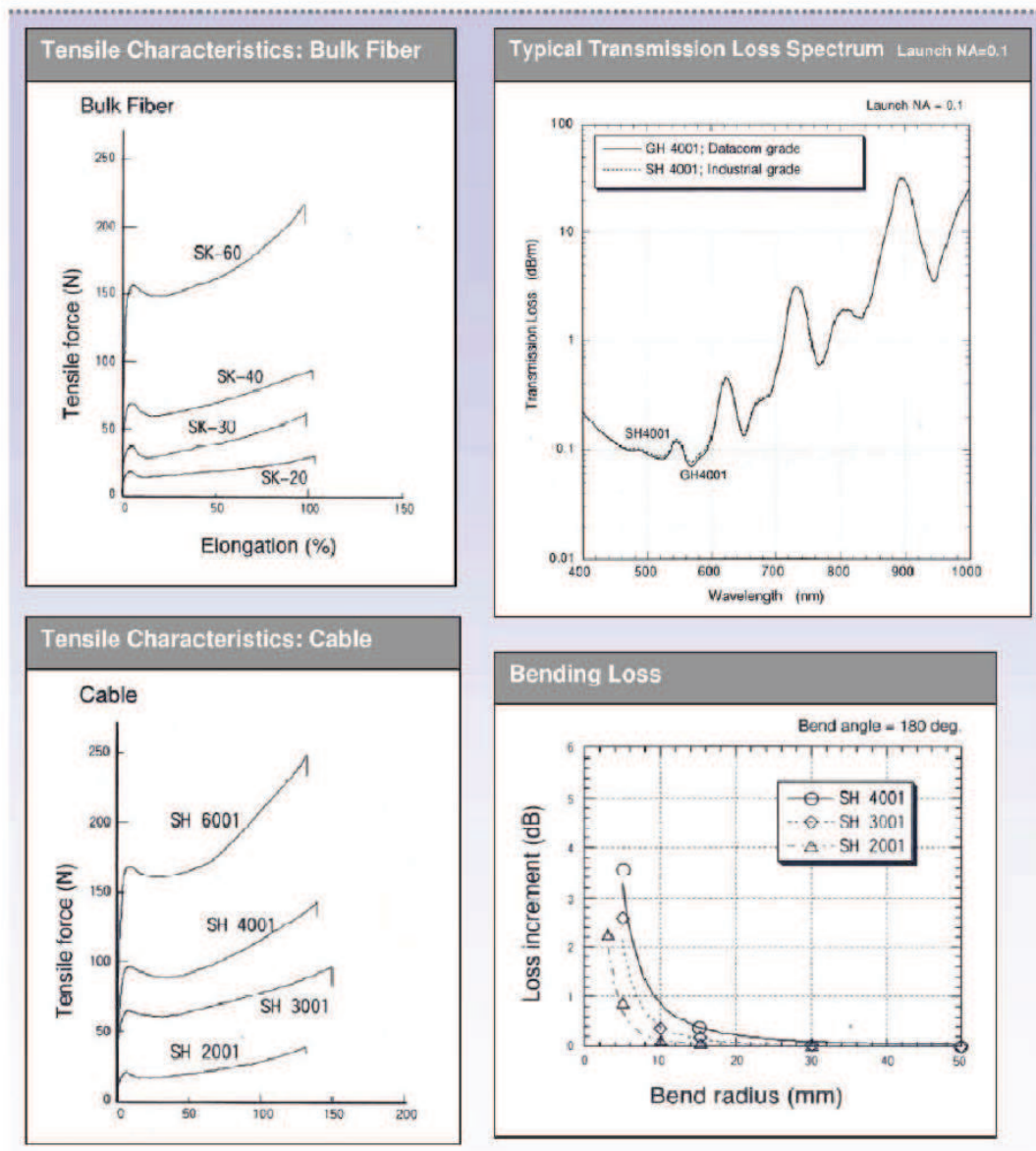
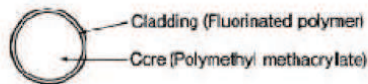


Figura. XV Curvas características de la fibra Eska Mitsubishi, GH-4001.

B. I. II FIBRA TORAY, PGU-FB1000.

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

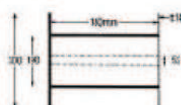


POLYMER OPTICAL FIBER

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-F31500	~0.15	1.5	700	B
	PFU-FD1000	PGU-F31000	~0.15	1.0	1500	D
	PFU-FB1000	PGU-F31000	~0.15	1.0	5250	A
	PFU-FB750	PGU-F3750	~0.15	0.75	2700	B
	PFU-FB500	PGU-F3500	~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-F33000	~0.20	3.0	150	B
		PGR-F32000	~0.20	2.0	350	D
		PGR-F31500	~0.20	1.5	700	B
		PGR-F31000	~0.20	1.0	1500	B
		PGR-F31000	~0.20	1.0	5250	A
		PGR-F3750	~0.20	0.75	2700	B
		PGR-F3750	~0.20	0.75	9000	A
		PGR-F3500	~0.25	0.5	6000	B
		PGR-F3250	~0.30	0.250	12000	B



Spool Type A



Spool Type B



Figura. XVI Hoja de datos de la fibra Toray, PGU-FB1000.

B. I. III FIBRA HFBR-RUS100Z

Plastic Optical Fiber Specifications: HFBR-R/EXXXXX

Absolute Maximum Ratings

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

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

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

Notes:

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

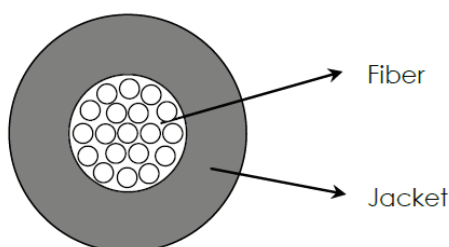
Figura. XVII Hoja de datos de la fibra HFBR-RUS100Z.

B. I. IV FIBRA ASHI KASEY, SMCK-1000.**AsahiKASEI**

SMCK-1000P(MC-7450N-E-04)

1, STRUCTURE

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

2, PROPERTIES

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

3, RoHS certification

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

Sample conditions

Temperature: $T = 23^{\circ}\text{C}$
 Humidity: $\text{RH} = 50\%$
 Storage time: $t = 200\text{h}$

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

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

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

Light Source : LED (Peak Wavelength = 657nm)

Transmission Rate $\geq 90\%$

Figura. XVIII Hoja de datos de la fibra Ashi Kasey, SMCK-1000.

B. II CONECTORES.

B. II. I CONECTOR ST.

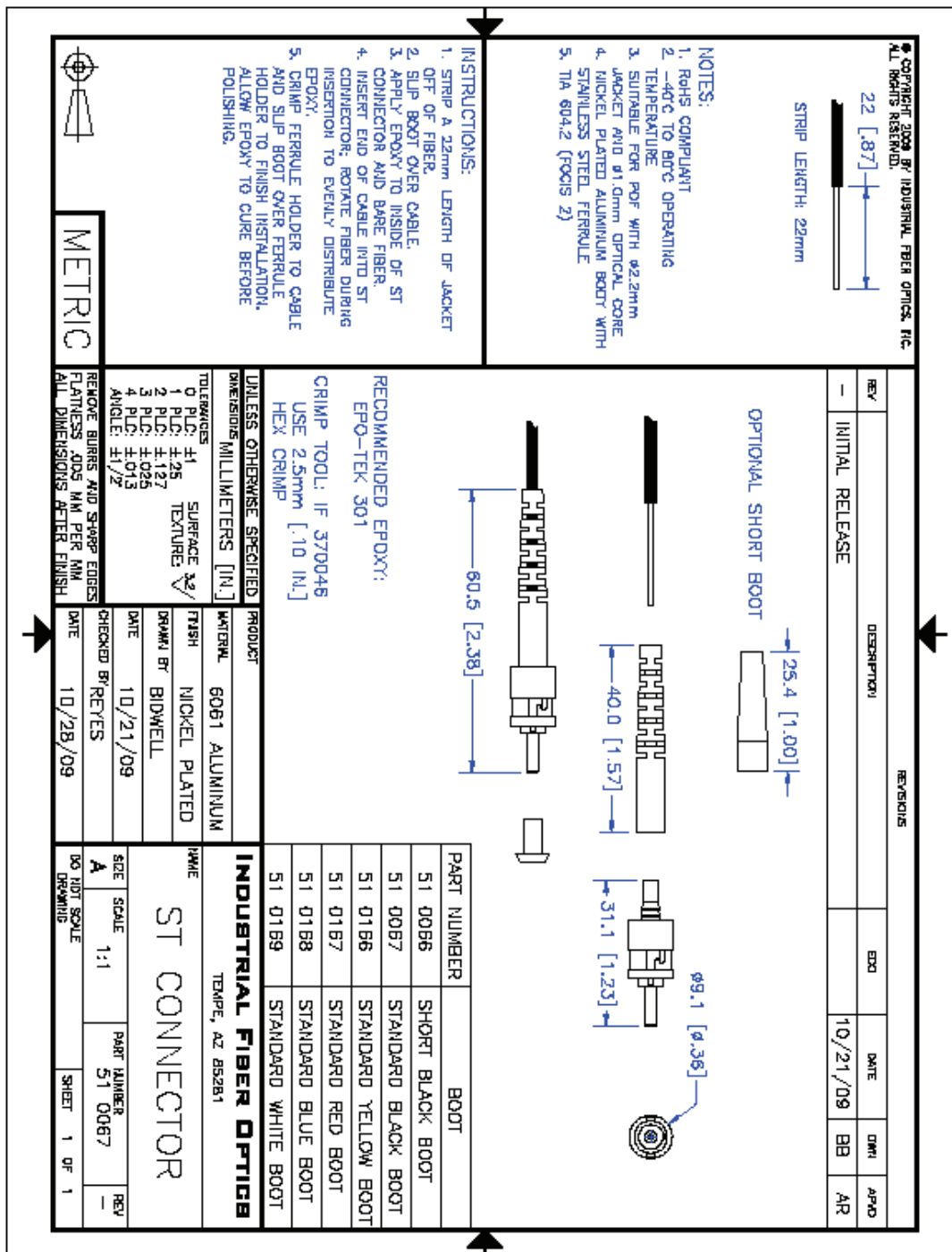


Figura. XIX Hoja de datos del conector ST.

B. II. II CONECTOR VL.

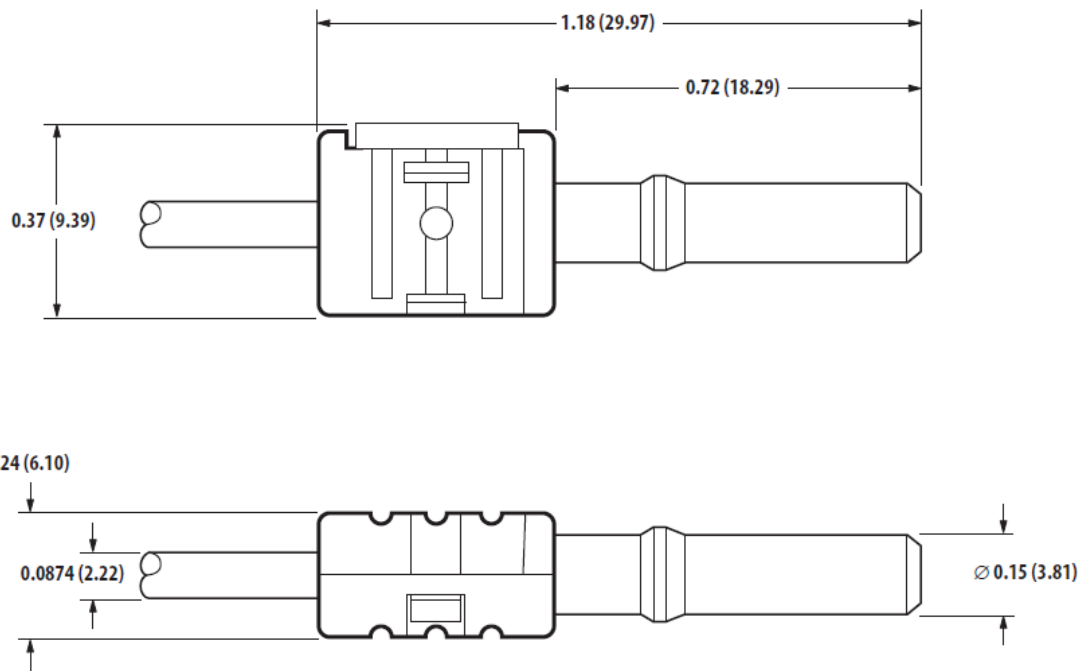
HFBR-4531/4532/4533/4535

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min	Max	Units	Note
Storage Temperature	T _S	-40	+85	°C	1
Operating Temperature	T _O	-40	+85	°C	1
Installation Temperature	T _I	0	+70	°C	1

Connector Mechanical Characteristics

Parameter	Part Number	Symbol	Min	Typ	Units	Temp °C
Retention Force to HFBR-0501 Series	HFBR-4531	F _{R-C}	3	8	N	+25
	HFBR-4532		47	80		
Retention Force to HFBR-0508 Series	HFBR-4531		8	12		
Tensile Force, Connector to Cable	HFBR-4531	F _T	40	50		-40 to +85
	HFBR-4532					



All dimensions are in inches and (millimeters).

Figura. XX Conector VL.

B. III DISPOSITIVOS.

B. III. I EQUIPO FOTEC.

Smart Power Meters

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

Minisources

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

Tabla. II Características del sistema de medidas Fotec.

Performance

Selectable resolution: 0.1 or 0.01 dB

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

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

Temperature coefficient: 0.1%/C

Operating temperature range:-10 to 50 C

Storage temperature range:-30 to 60 C

Controls:

Power ON/OFF

Calibration wavelength (also selects display resolution)

Measurement ranges (also sets dB reference level)

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

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

*Specify Connector ST/SC/FC

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

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

Controls:

Output power: adjustable, trimpot

OFF/Wavelength (LEDs)

OFF/CW/2kHz (Lasers)

Wavelength select (S795 only)

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

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

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

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

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

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

B. III. II CÁMARA DINO-LITE.**Specifications**

Model	AD4113TL Dino-Lite Premier
Interface	USB 2.0
Product Resolution	1.3M pixels (SXGA)
Magnification Rate	20x~90x
Sensor	Color CMOS
Frame Rate	Up to 30fps
Save Formats	Image: DinoCapture2.0: BMP, GIF, PNG, MNG, TIF, TGA, PCX, WBMP, JP2, JPC, JPG, PGX, RAS, PNM DinoXcope: PNG, JPEG Movie: DinoCapture2.0: WMV, FLV, SWF DinoXcope: MOV
Microtouch	Touch sensitive trigger on the microscope for taking pictures
Lighting	8 white LED lights switched on/off by software

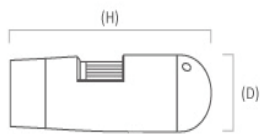
Measurement Function	Yes
Calibration Function	Yes
Operating System Supported	Windows 8, 7, Vista, XP MAC OS 10.4 or later
Unit Weight	105(g)
Detachable front covers	FC-OC1, FC-L-CC2
Unit Dimension	10.5cm (H) x 3.2cm (D) 
Package Dimensions	16cm (L) x 16cm (W) x 6cm (H)

Tabla. III Características del cámara Dino-Lite.

B. III. III MEDIDOR DE POTENCIA THORLABS.

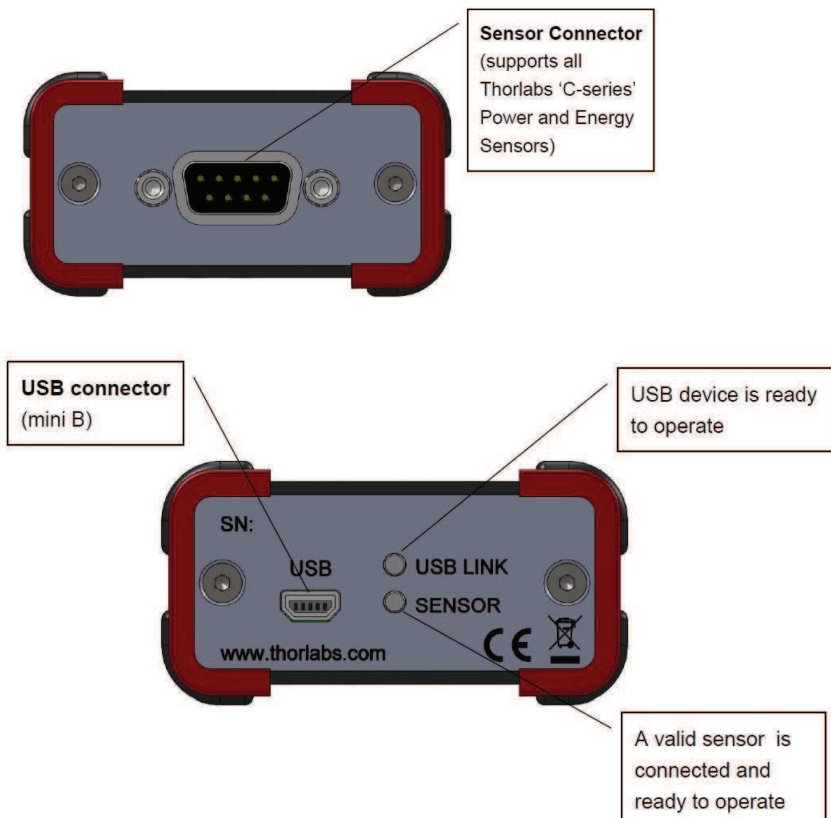
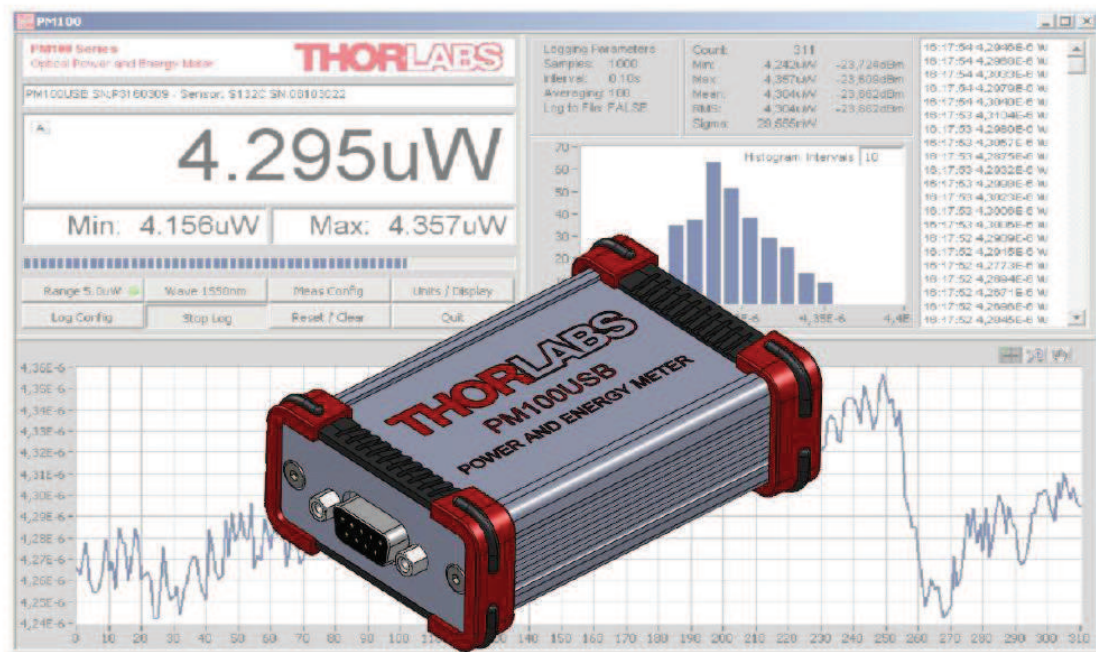


Figura. XXI Medidor de potencia Thorlabs.

Voltage Input (Pyro Sensors)	
Connector	DB9F, left side
Units	J, J/cm ² , W, W/cm ² , V
Measurement Ranges	4 decades; 100mV ... 100V Ranges selectable in J or V, sensor depending
Display Resolution	100μV / responsivity value (V/J)
AD Converter	16 bit
Accuracy	+/- 0.5% f.s.
Trigger Threshold	0.1% - 99.9% f.s.
max. Repetition Rate	3 kHz
Input Impedance	1 MΩ
Wavelength Correction	Sensor depending; nm, (V/J)
Beam Diameter Setting	1/e ²
Sensor Temperature Control	
Supported temperature sensor	Thermistor
Temperature measurement range	-10 °C .. +80 °C
Interface	
Type	USB2.0
Connector	Mini USB
Power Management	
External power supply DC Input	5 VDC via USB
Accessories	
USB cable (2m)	✓
Instrument Drivers on USB Stick	✓
Application Software on USB Stick	✓
User Manual on USB Stick	✓

Tabla. IV Características del medidor de potencia Thorlabs.

General Data	
Detector Compatibility	Photodiode Sensors S100C Series Thermal Sensors S300C Series Pyroelectric Sensors ES100C/ES200C Series Photodiodes (max. 5.5mA) Thermopiles (max. 1.1V) Pyros (max. 110V)
Display Type	External PC – Windows application
Display Update Rate (max)	Up to 500 Hz depending on PC and settings
Display Format	Numerical, Bargraph, Trendgraph, Statistics, Histogram with utility software
Dimensions (H x W x D) Overall	95 x 63.5 x 32.5 mm ³
Weight	< 0.2 kg
Operating Temperature	0°C - +40°C
Storage Temperature	-40°C - +70°C
Relative Humidity	Max. 80% up to 31 °C, decreasing to 50% at 40 °C
Operation Altitude	< 3000 m
Current Input (Photodiode Sensors)	
Connector	DB9F, left side
Units	W, dBm, W/cm ² , A
Measurement Ranges	6 decades; 50 nA ... 5 mA Ranges selectable in W or A, sensor depending
Display Resolution	1 pA / responsivity value (A/W)
AD Converter	16 bit
Accuracy	+/- 0.2% f.s. (5 μ A – 5 mA) +/- 0.5% f.s. (50nA)
Bandwidth (analog)	DC – 100 kHz, depending on sensor and settings
Photodiode Polarity	Cathode ground
Max. Photodiode Impedance	10 nF
Input Resistance	0 Ω (virtual ground)
Wavelength Correction	nm (A/W)
Beam Diameter Setting	1/e ²
Voltage Input (Thermopile Sensors)	
Connector	DB9F, left side
Units	W, dBm, W/cm ² , V
Measurement Ranges	4 decades; 1 mV ... 1V Ranges selectable in W or V, sensor depending
Display Resolution	1 μ V / responsivity value (V/W)
AD Converter	16 bit
Accuracy	+/- 0.5% f.s.
Bandwidth	DC - 10Hz, depending on sensor and settings
Input Impedance	1 M Ω
Time Constant Correction Range	1 s – 30 s
Wavelength Correction	Sensor depending; nm, (V/W)
Beam Diameter Setting	1/e ²

Tabla. V Hoja de datos del medidor de potencia Thorlabs.

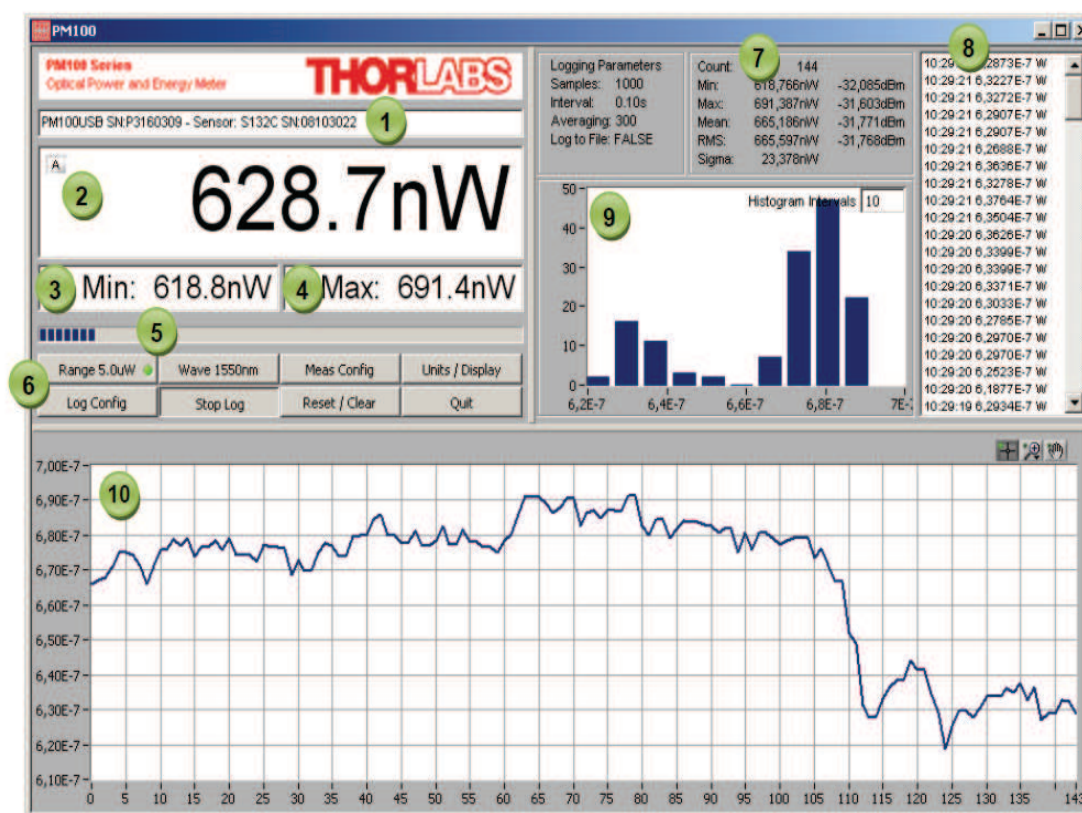
ANEXO C. SOFTWARE UTILIZADO.**C. I PROGRAMA DE CONTROL DEL MEDIDOR THORLABS.**

Figura. XXII Captura del programa de control del medidor de potencia Thorlabs.

1. *Cabecera* (1). Este indicador muestra la configuración del dispositivo:

- Tipo de consola (PM100USB).
- Número de serie de la consola.
- Tipo de sensor.
- Número de serie del sensor.

2. *Pantalla principal* (2).

La pantalla tiene una resolución de pantalla configurable. Independiente de la gama de medición de la pantalla siempre tiene la plenitud de los dígitos seleccionados. Para lograr la mejor resolución convertidor AD es necesario establecer el rango de medición de acuerdo con la señal a medir. Un indicador de disparo muestra si la unidad está muestreando indicador de datos "A" o un nuevo valor de medición se visualiza el indicador de "T" y la luz verde.

3. *Pantalla secundaria de la izquierda* (3).

La pantalla cuenta con los siguientes elementos configurables:

- Sin pantalla.
- Valor máximo hasta que se restablezca el muestreo.
- Relación de max / min valor - de muestreo hasta que se restablece.

4. *Sub Display de la derecha* (4)
La pantalla cuenta con los siguientes elementos configurables, las posibles opciones dependen del sensor conectado:
 - Sin pantalla.
 - Valor mínimo - muestreo hasta que se restablece.
 - La frecuencia o repetición tasa.
 - Temperatura.
 - La resistencia del sensor de temperatura.
5. *Indicador gráfico de barras* (5)
El indicador gráfico de barras muestra la incidencia o el rango de medición utilizado.
6. *Funcionamiento y configuración Botones* (6)
 - Deja de botón de acceso directo: [*Shift* + *F8*].
 - detiene la aplicación PM100.
 - para reiniciar pulse la flecha blanca en la barra de herramientas.
7. *Pantalla del usuario* (7)
Los valores estadísticos en representación lineal y logarítmico.
8. *Pantalla de registro de datos* (8)
Muestra los datos de la historia de explotación.
9. *Histograma* (9)
Histograma de energía / Energía.
 - Histograma muestra los datos.
10. *Display gráfico* (10)
Gráfico de energía / Energía con auto escala Y y una longitud historia 1.000 puntos.

C. II SOFTWARE PARA CONTROL DE CÁMARA DINO-LITE.

La cámara *Dino-Lite* contiene un disco de instalación con un software “*DINOCAPTURE 2.0*” diseñado por su fabricante, dicho programa es el que permite una interfaz cómoda de trabajo para el usuario y permite explotar al máximo el rendimiento de la misma.

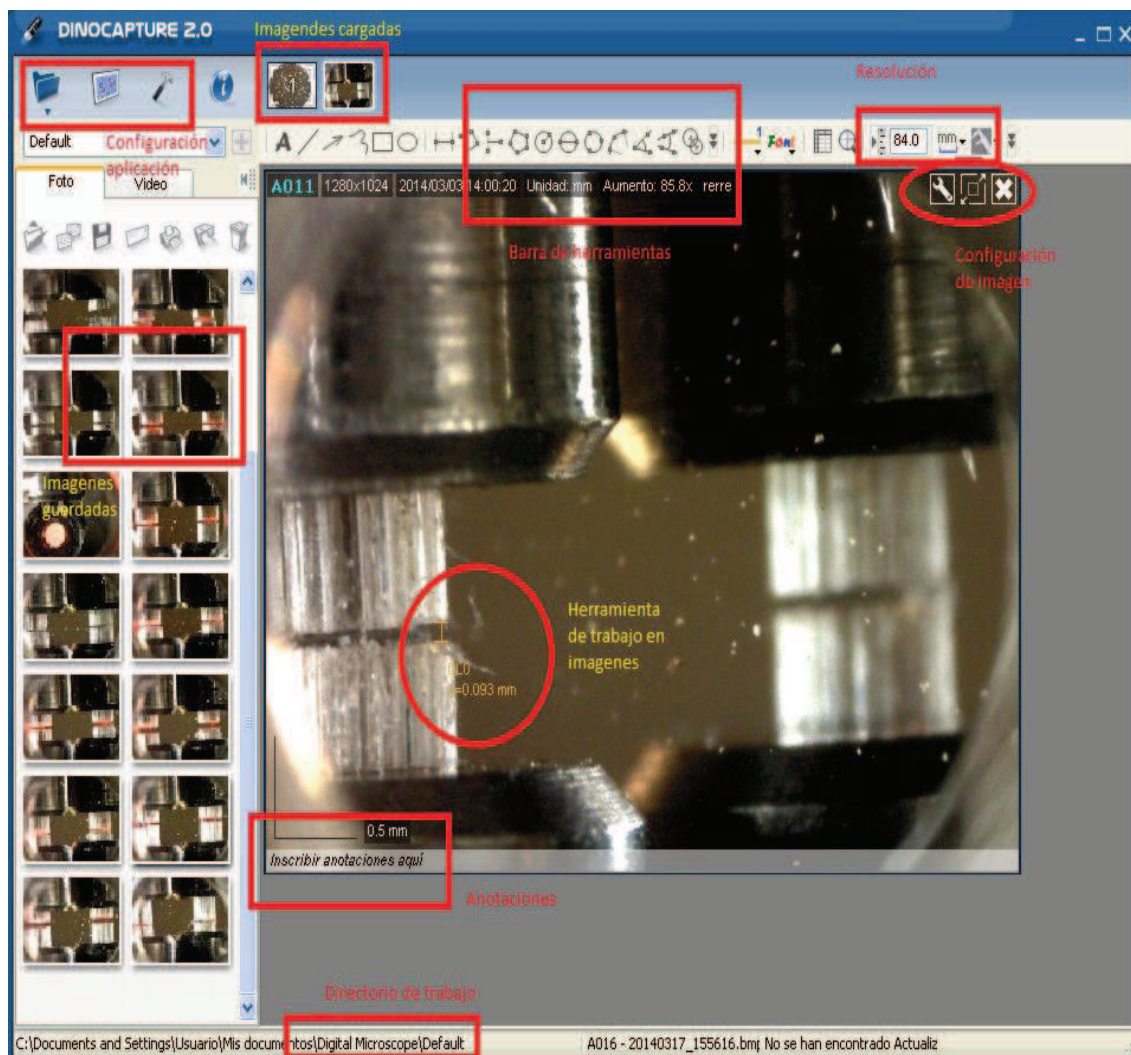


Figura. XXIII Captura del programa de control de la cámara Dino-Lite.

Configuración aplicación: permite seleccionar carpeta de trabajo. Herramientas de tratamiento para las imágenes. Imágenes salvadas o creadas en otras instancias. Proporciona ayuda online.

Imágenes cargadas: Banco de imágenes pertenecientes a uno o varios espacios de trabajo que han sido cargados por el usuario.

Barra de herramientas: Conjunto de herramientas que se pueden emplear manipular y trabajar con la imagen en específico que se esté visualizando.

Resolución: Permite ajustar la resolución de la cámara. Aconsejable utilizar una plantilla proporcionada por el fabricante antes de realizar cualquier trabajo.

Imágenes guardadas: Conjunto de imágenes pertenecientes a un espacio de trabajo y que han sido almacenadas en el mismo.

Configuración de imagen: Permite trabajar sobre la imagen visualizada y controlar el encendido del flash, configuraciones sencillas y manipulación de imagen.

Herramienta de trabajo de imágenes: Es una muestra de la aplicación de la barra de herramientas en este caso permitía trazar una línea entre dos puntos cualesquiera, haciendo uso de la calibración se obtiene un valor real.

Anotaciones: Pie de imagen, permite anotar, añadir, agregar notas al pie de la imagen.

Directorio de trabajo: Ruta de trabajo del proyecto ejecutado. Espacio de trabajo.

C. III SOFTWARE PARA ALINEACIÓN DE MOTORES.

El software *NSC200 NewStep Controller Utility* permite manejar y controlar los motores conectados a la matriz *NSC-SB*. El objetivo es dar una interfaz agradable para el usuario y fácil de configurar. Este programa desarrollado en *LabView* está creado para manejar tantos motores como le permita controlar la matriz y en todos modificar desplazamiento, offset, velocidad y demás parámetros.

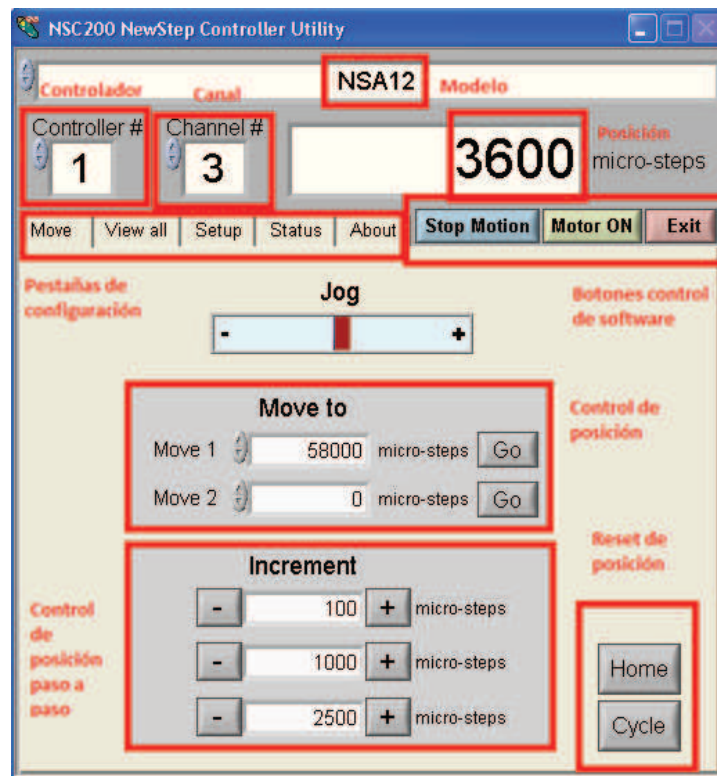


Figura. XXIV Captura del programa NSC200 NewStep Controller Utility: centrado.

Modelo: Identifica el modelo de motor que está siendo controlado mediante la matriz. Es necesario tener presente antes de comenzar qué modelo de motores empleamos.

Controlador: Permite identificar con qué matriz se está trabajando.

Canal: Permite identificar en cada matriz a qué motor se desea configurar ciertos parámetros.

Posición: Muestra la posición real que tiene configurada el motor marcado.

Botones control de software: Permite para el proceso de ajuste, medición o configuración así como deshabilitar o habilitar un motor. Además permite salir del programa.

Pestañas de configuración: Configuran todo los aspectos de software, offset, desplazamientos máximos, desplazamientos mínimos, velocidad, aceleración. Permite ver la configuración de cada motor de manera independiente y ajustar otros parámetros de ello. Permite conocer el estado de la conexión con el motor y presente una ayuda online.

Control de posición: Ajuste del desplazamiento de los motores, tiene un valor máximo y un mínimo que debe ser previamente configurado en las “Pestañas de configuración”. Si el usuario se excede de esos valores se dará un error. Trabaja sobre el motor seleccionado.

Control de posición paso a paso: Permite realizar el desplazamiento de manera cuidadosa y de paso a paso, se va incrementando/decrementando la posición de acuerdo al botón marcado por el usuario y el offset añadido. Trabaja sobre el motor seleccionado.

Reset de posición: Son botones configurables en las “Pestañas de configuración” y permiten volver a la posición inicial de los motores. Muy útiles en caso de que se sobrepasen los límites de desplazamiento de los motores.

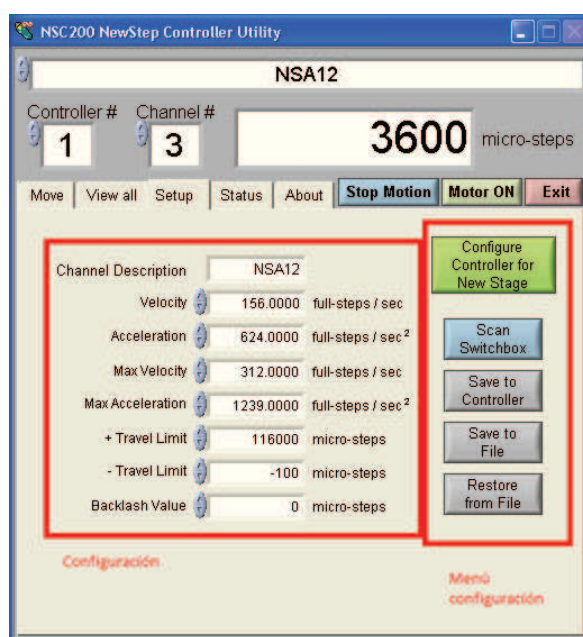


Figura. XXV Captura del programa NSC200 NewStep Controller Utility: configuración.

Configuración: Permite ajustar los parámetros de controlador para el motor. Es necesario conocer por el fabricante dichos valores para no incurrir en ciertos errores. Estos parámetros deben ser configurados y guardados, son característicos de un modelo de motor.

Menú configuración: Ajuste de configuración, guardar, cargar, configurar con carga de un archivo, etc.

C. IV PROGRAMA DE CONTROL DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.

El programa *Conector_Pérdidas* permite el control sobre el sistema experimental. Este programa ha sido desarrollado en la *EINA* basado en *LabView* y su objetivo es el control del sistema de motores *XY* además de permitir la representación de la matriz de transmisión de potencia de una fibra a otra.

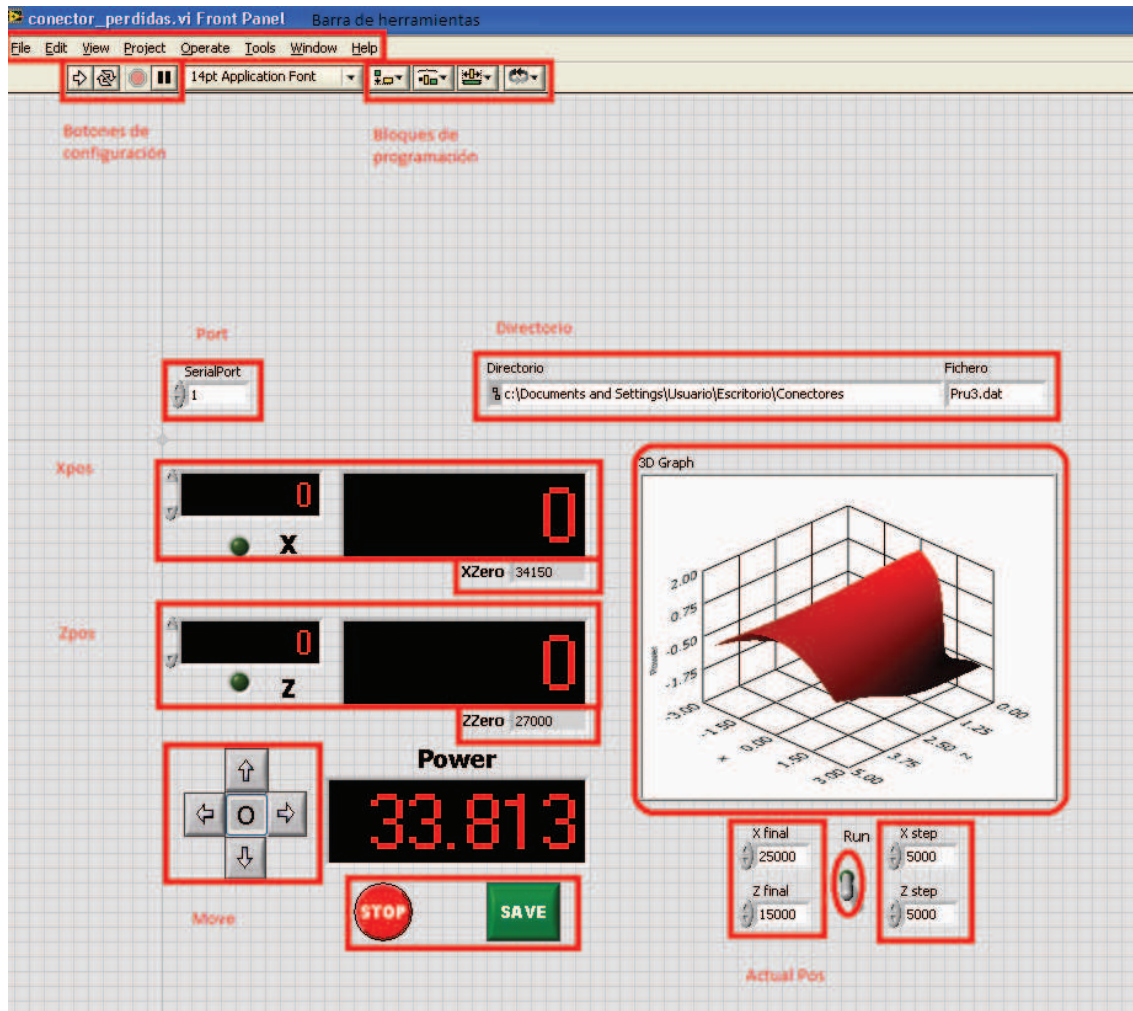


Figura. XXVI Captura del programa Conector_Pérdidas.

Barra de herramientas: Control de acceso a la configuración del programa. Abrir, guardar, etc.

Botones de configuración: Permite la carga del programa. Es necesario para el comienzo del programa permite arrancar el proceso de los motores.

Bloque de programación: Acceso al código del programa, permite reconfigurar y controlar la ejecución de cada bloque.

Directorio: Ruta de acceso al fichero donde se guardarán los resultados. Permite cambiar el nombre del fichero así como la ruta.

Port: Puerto de configuración por defecto toma el puerto serie.

Xpos y Zpos: Posición actual de los motores.

XZero y *ZZero*: Posición origen de los motores. Posición de partida.

Power: Potencia medida en ese punto que se encuentren los motores.

Move: Botones de acción secuencial sobre los motores, pasos pequeños.

Stop y *Save*: Una vez que comienza a correr el barrido este se puede parar o esperar al final para poder salvar el contenido en la dirección asignada en “*Directorio*”.

Actual Pos: Posición actual de los motores dentro de la ejecución, posición final de los motores, paso de los motores y comienzo de ejecución.

3D Graph: Visualización de la matriz creada por el barrido de los motores.

C. V PROGRAMAS DESARROLLADOS.

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

Multicore_Rotatio_Loss.m: programa mediante el cual se realiza las medidas de simulación para las fibras de múltiples núcleos. Con este se obtienen las *Fig. 17* y *18*.

figuras.m: programa para el cálculo de las pérdidas por desalineamientos rotacional, transversal y longitudinal, además para las combinaciones entre ellos mostradas. Con el obtenemos las *Fig. 16, 17* y *19-23*.

Histoconnect.m: programa para la representación en forma de histograma de los datos obtenidos experimentalmente para las cortadoras. Representación de los histogramas de la *Fig. 12*.

Plosticton14.m: programa para la representación de los datos de cada cortadora, pulidos, sin pulir, media y varianza de las cortadoras. Con el obtenemos las *Fig. 8-11*.

ANEXO D. ARTÍCULOS PUBLICADOS.

Influence of Termination on Connector Loss for Plastic Optical Fibres

M. A. Losada, F. A. Domínguez-Chapman, J. Mateo, A. López, J. Zubia*

*Photonics Technology Group (GTF), Aragón Institute of Engineering Research (i3A),
Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain*

**University of the Basque Country, Bilbao, Spain*

Tel: (34) 976 762373, Fax: (34)976 76 2111, e-mail: alosada@unizar.es

ABSTRACT

We assess the influence of fibre end termination on connector loss for single-core and multi-core plastic optical fibres (POF) using different finishing procedures. Insertion loss for standard ST connectors was measured for fibres from different manufacturers but all with poly-methyl-methacrylate (PMMA) cores, high numerical apertures (NAs) and claddings of 1 mm diameter. We tested single-core fibres with step-index (SI) profiles and a multi-core fibre with 19 cores. We found that the most suitable tool is different depending on the fibre characteristics and that connector insertion loss can be as low as 0.5 dB confirming the high impact of the finishing procedure.

Keywords: Plastic optical fibres, optical networks, connectors, optical power loss.

1. INTRODUCTION

Plastic optical fibres (POF) have proven to be a competitive transmission media in short range applications as in-house and automotive networks. The higher attenuation and lower transmission rates of POFs do not pose an obstacle at these lengths while their large sizes and numerical apertures ease light coupling and connection and allow the use of low-cost active components. Short reach networks, however, are characterized for their large connectivity which, due to the lack of an effective method for splicing POFs, is generally provided by connectors. As the POF connector loss is large, generally over 1 dB [1], the need of a great number of in-line connectors is a challenge for the POF optical power budget, reducing maximum link length along with fibre attenuation. In addition, 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 [2-4]. In a previous work [1], we measured insertion loss for different connector types and for several step-index (SI) single-core 1 mm PMMA fibres. We concluded that connector losses change depending on the termination procedure applied to the fibre ends and that the tool that produces the minimum insertion loss can be different for each fibre type. In all cases, we found that a polishing procedure reduced connector loss. Then, we characterized the changes in angular power distribution introduced by different connector types on each fibre that is the clue to understand their impact on bandwidth and thus, on network performance [2-4]. We verified that different connector types produced distinct power spreading related to the fibre end distance provided by the double connector structure and different overall loss. In addition, we studied theoretically and experimentally the additional variability introduced by transversal and longitudinal misalignments in the insertion loss [5] that can also have an impact in fibre transmission properties. Multi-core POFs, due to their small bending loss, have been considered as a promising candidate for short range applications but its connector loss can be increased by the extra degree of freedom introduced by the relative position of the cores. Thus, taking as a starting point our previous work [1], here we present a more thorough analysis of the insertion loss of standard ST connectors extended to more single-core fibres and also a multi-core fibre together with a very thorough and extensive analysis of termination procedures and tools.

The paper is organized as follows. We first present the procedure used to measure insertion loss and describe the termination tools making special emphasis on the razor cutters. Next, connector losses are shown for each of the different fibre and termination tool combination to determine the optimal for each fibre type. Then, the global performance of the different termination tools is assessed regarding not only absolute power loss but also other parameters such as loss variability, ease of manipulation, durability, etc. The impact of subsequent polishing is also analysed. Finally, we discuss our results and summarize the conclusions derived from them.

2. EXPERIMENTAL METHODS

We have studied four single-core fibres and one multi-core fibre. The single-core fibres are: PGU-FB1000 (PGU) from Toray, HFBR-RUS100Z (HFB) from Agilent and ESKA PREMIER from Mitsubishi: GH4001 with black jacket (BGH) and GH4002 duplex with white jacket (WGH). They all have SI profiles, NA near 0.5, a 1 mm core of PMMA and a 2.2 mm poly-ethylene (PE) jacket. The multi-core fibre is MSCK1000 (MSC) from Asahi Kasei. It has 19 PMMA cores with 200 μ m diameters and SI profiles, a cladding diameter of 0.9 mm and a

2.2 mm PE jacket. Connector loss was also measured for other different fibres types and the results used to assess the tools and procedures but not for an individualized study.

Connector insertion loss has been obtained using standard POF equipment (a LED-based transmitter at 665 nm and power meter from Fotec). Power was measured for short segments of the fibres (from 75 to 125 cm) before and after inserting the connectors. After dividing the segment in two, each fibre end was finished using tools specific for POFs. The termination protocol applied consisted in cutting the fibre first and then, stripping the jacket length necessary to fit the connector. In this study, we prepared the fibre ends using the three different razor cutters shown in Figure 1 to evaluate their performance for each fibre type:

Cutter A: Fibre cutter B0605005, is a metal razor cutter that is able to perform up to 5000 cuts according to manufacturer. It has the added advantage that can be used without a supporting surface [6].

Cutter B: Disposable razor cutter IF-FC4, recommended to use only once per hole [7].

Cutter C: POF Cutter Block IF-FC1, each razor is recommended for up to 50 uses. It needs a very firm and plane supporting surface to give good results [8].

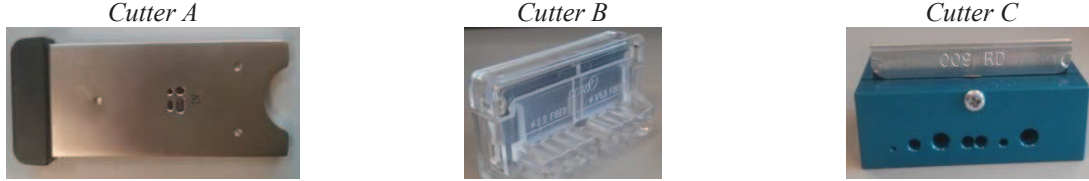


Figure 1. Fibre cutters: on the left, cutter A, in the middle, disposable cutter B, and on the right, cutter block C.

The jacket stripper used to remove the 17 mm required to fit the ST connector was the Micro-Strip™ from [9]. After fitting the two connectors and joining them with a double connector, the power was measured again and loss obtained comparing to the initial power measurement. Moreover, we analysed the effect of polishing after using each of the cutters. The polishing tool were two sandpapers with different roughness levels (ref IF CPK: Kit containing two sheets 10 x 14 cm of 2000-grit and 3 µm polishing films) and the procedure was performed manually by pressing the fibre to the paper following a figure 8 polishing pattern several times. Its duration depended on the quality of the cut that was different for different fibres and different cutters. The power was also measured after polishing to obtain a new value of connector loss.

3. RESULTS

In this section, we first make an individualized analysis of connector loss for each fibre type to assess the cutter most suitable for it. Then, we consider all the available data in order to obtain a histogram for each cutter and evaluate its global performance. Increment of connector loss was represented versus the number of cuts to assess the durability of each tool. Finally, we discuss the effect of polishing the ends of the fibres on connector loss.

3.1 Connector loss for different fibres

Connector losses were obtained for the 5 fibre types using each of the 3 razor cutters. The average and standard deviation were calculated from at least 8 measurements for each cutter-fibre pair. These results are shown in Figure 2.a (before polishing) and Figure 2.b (after polishing) for the 5 fibres and the 3 cutters.

The results show that the performance of cutter C is not satisfactory for the single-core fibres, giving losses always higher than 2 dB and with very high variability derived from the standard deviation. However, cutter C gives the best results for the multi-core fibre, 1 dB below those of cutter A. Cutters A and B produce very similar losses except for cutter A with the WGH and cutter B with the HFB where they are near or above 2 dB. Thus, providing the adequate tool is chosen, connector loss can be below 1.5 dB even before polishing that, as the figures illustrate, always reduces loss and deviation. Its global effect will be assessed later.

Average connector loss is lower for the single-core fibres than for the multi-core. Also, if we consider the best tool for each fibre after polishing, loss for the multi-core is 1.09 dB while for the other fibres is always below 0.7 dB. This significant difference between single and multi-core fibres can be explained by the misalignment of

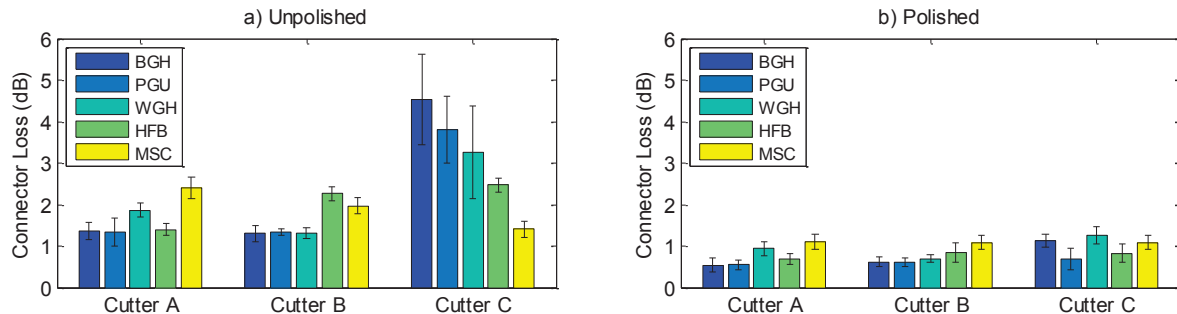


Figure 2. Average and standard deviation of connector loss. a) Unpolished connectors. b) Polished connectors.

individual cores in both fibres due to rotation over the fibre axis when inserted in the connector. In a control experiment, we found that this effect can account for an increase of 0.35 dB relative to single-core fibres.

3.2 Evaluation of the razor cutters

Here, we assess the performance of the different cutters analysing the histograms shown in Figure 3 that have been obtained by taking out all data for unpolished connectors, regardless of the fibre type, and using other fibres types different than those of the previous individualized study.

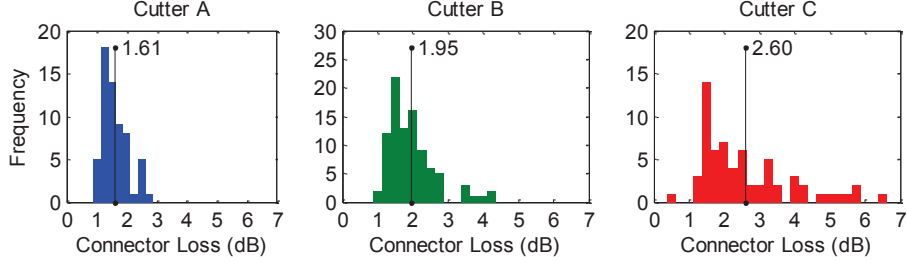


Figure 3. Histogram of unpolished connector loss for the three cutters.

The average insertion loss obtained with the three cutters from the data in the histograms is: 1.61, 1.95 and 2.60 dB for cutters A, B and C, respectively. Cutter A has lower losses and lower variability than cutters B and C, although the difference in average loss is not large with cutter B. The higher losses and variability obtained for cutter C can be explained by its poor results with the single-core fibres. The mode, however, is similar for the three graphs and around 1.25-1.5 dB. According to these histograms, the best global performance is attained with cutter A that is also easy to handle and does not need a firm surface for support.

In addition, the durability of cutter A outstands that of the other tools as illustrates Figure 4 that shows results of a durability test for the three razors. In these graphs, loss was measured for the fibre that gave the best results for the particular cutter. On the vertical axis the increment in loss for every five cuts is shown. This figure shows the remarkably good performance of cutter A with hardly any change after 40 cuts. It also shows that the use of cutter B can be extended beyond the manufacturer recommendations (only 1 cut). On the other hand, apart from its higher change rates, it was observed that cutter C has to be handled with care as the razors get easily damaged. In particular, when used with fibres with hard jackets the surface of the razor in contact with the used hole is chipped at the first use.

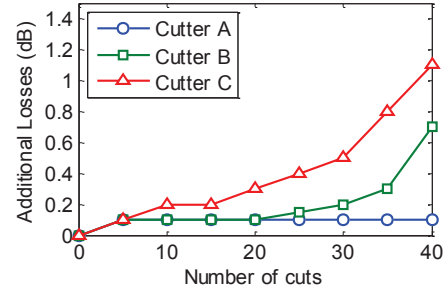


Figure 4. Additional losses as a function of the number of cuts.

3.3 Effects of polishing

The averages and standard deviations of connector loss shown in Figure 2.b confirm that polishing the fibre ends always diminishes connector loss that is below 1 dB for single-core fibres for most conditions, and less than 1.2 dB for the multi-core fibre. The standard deviation is also reduced below 0.25 dB. In fact, polishing equalizes the losses for all fibres and reduces the differences between the cutters at the cost of a longer and harder polishing procedure when starting from rougher and less uniform surfaces. For example, polishing takes much longer for the PGU fibre terminated with cutter C than when it is terminated with cutter B, even if the final loss ends up being very similar.

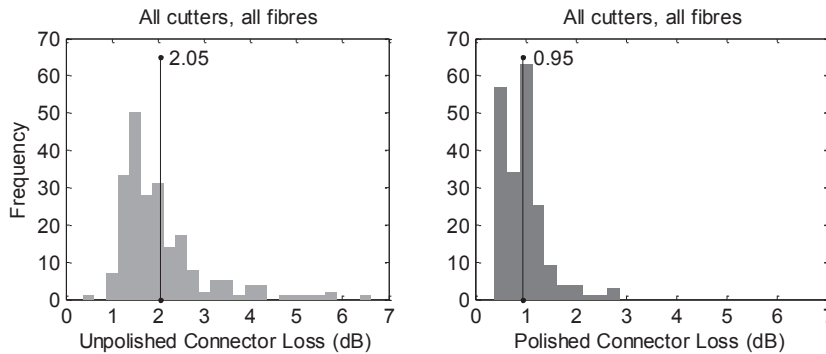


Figure 5. Histograms of connector loss for unpolished ends (left) and polished ends (right).

The global effect of polishing can be visualized in the histograms shown in Figure 6 obtained for unpolished and polished fibre ends. These figures clearly confirm that, when the polished protocol is performed, both the average and the mode of insertion loss are pushed down (the average from 2.05 dB to 0.95 dB, and the mode from 1.5 dB to 1 dB) and the variability is also highly reduced.

4. DISCUSSION

In our previous study of connector loss using only SI single-core fibres we measured losses for ST and Versalink (VL) connectors using cutters A and B. We found that with any of the two cutters, connector losses for a given fibre are similar for ST and VL connectors and that cutter A produced slightly lower insertion losses and lower variability than cutter B, which is in agreement with our present results as demonstrated by the histograms in Figure 3. Here, we also concluded that cutters A and B perform better for single-core fibres, while cutter C gives very poor results. In fact, in the previous study, cutter C was discarded as its losses were always very high. Now, we have seen that its razor is actually damaged when used with harder jackets and more compact fibres. On the contrary, cutter C shows an excellent performance for fibres with softer jackets and is particularly good for the multi-core, which may offer less resistance than the single-core. Also, although all fibre jackets were nominally made of PE, there may be some variants of the same material with different resistance or hardness.

Our present study has rendered lower losses for the single-core fibres obtained after polishing (0.78 dB) than those obtained in the previous study (0.88 dB) probably because here polishing was applied until the surface was sufficiently smooth. We have determined that, although polishing always improves termination quality and diminishes loss, its extent depends on several factors. The connector type can constrain the effects of polishing as we showed in [1] that, before polishing, ST and VL connectors have similar insertion loss, but after polishing, it was significantly higher for the VL connector due to the easier intrusion of the polishing slurry. Also, the length of the polishing procedure is determined by the initial quality of the end surface so that a better cut needs less polishing to obtain the same final results. Thus, the correct choice of tool can save a lot of time. However, for rough surfaces not even a very long and extensive polishing lowers the loss down to the result obtained when starting from a more regular surface. Although the decrease in loss introduced by polishing a single connector is not large, it can be important when the link includes tenths of connectors as in railway or airplane networks.

5. CONCLUSIONS

We conclude that a careful use of the finishing tools can greatly improve the quality of the termination and thus, lower connector insertion loss. We found that ST insertion loss for single-core fibres can be below 1.5 dB depending on the cutter used, and that this value can be as low as 0.5 dB after polishing for some of the single-core fibre types. For multi-core fibres connector losses are significantly higher which can be explained by the misalignment of individual cores in both ends due to rotation over the fibre axis when inserted in the connector. We have determined that, if a polishing protocol is applied to the fibre ends, the ST connector loss is practically independent on the tool used. Thus, the polishing procedure equalizes the performance of the cutters but the duration of the process is not the same depending on the initial termination quality. Still, for networks with high connectivity, the extra time devoted to install the connectors may be worth it as it can significantly increase the power budget.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Spanish government under Grant TEC2012-37983-C03-03. We want to particularly thank Asahi Kasei and their representatives in Europe, Sojitz Europe PLC for donating the MSCK1000 fibre.

REFERENCES

- [1] A. Esteban, M.A. Losada, J. Mateo, N. Antoniadis, A. López, and J. Zubia,: Effects of Connectors in SI-POFs Transmission Properties Studied in a Matrix Propagation Framework, in *Proc. of 20th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application 2011*, Bilbao, Spain, 2011.
- [2] E. Grivas, D. Sivridis, and 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.
- [3] N. Antoniadis, M. A. Losada, J. Mateo, D. Richards, T. K. Truong, X. Jiang, and N. Madamopoulos,: Modeling and Characterization of SI-POF and Connectors for Use in an Avionics System, in *Proc. of 20th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application 2011*, Bilbao, Spain, 2011.
- [4] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos, Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 3, 468-475, 2013.
- [5] J. Mateo, M. A. Losada, N. Antoniadis, D. Richards, A. López, and J. Zubia,: Connector Misalignment Matrix Model, in *Proc. of 21th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application 2012*, Atlanta, US, 2012.

- [6] Fiber Cutter B0605005 (B): <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=110>.
- [7] Disposable Fiber Cutter IF-FC4 (A): <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=120>.
- [8] POF Cutter Block IF-FC1 (C): <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=105>.
Jacket stripper: Micro-Strip TM with replacement blades ref 37 0077, <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=330&cat=stripping>.

Characterization of Misalignments in Multi-Core Plastic Optical Fibres

Frank A. Domínguez-Chapman⁽¹⁾, M. A. Losada⁽¹⁾, Javier Mateo⁽¹⁾.

frankale1988@gmail.com, alosada@unizar.es, jmateo@unizar.es.

⁽¹⁾ Photonics Technology Group (GTF), Aragón Institute of Engineering Research (i3A), University of Zaragoza, Zaragoza, Spain.

Abstract- In this paper, a complete analysis of the different misalignments in multi-core plastic optical fibre (MC-POF) has been performed. We measured rotational, axial and longitudinal misalignment losses for a 1 mm fibre of 19 cores using a commercial source specific for POFs. We used an experimental set-up that permitted the study of the misalignments both separately and in combination. Then, the experimental results have been compared to predictions obtained with simple mathematical models. The impact of the different misalignments on connector insertion loss has been assessed. We propose that rotational misalignment can be the reason for the higher losses found for multi-core fibre connectors compared to those of single-core fibres.

I. INTRODUCTION

Plastic optical fibres (POF) have been established as a competitive transmission media in short range applications as in-house and automotive networks. The higher attenuation and lower transmission rates of POFs are not an obstacle at these lengths while their large sizes and numerical apertures ease light coupling and connection and allow the use of low-cost components. Short reach networks are characterized for the presence of a great number of in-line connectors that, due to their large loss (generally over 1 dB [1]), poses a challenge for the POF optical power budget, also changing maximum transmission rates depending on their position relative to transmitter and receiver [2-4]. The termination procedure of the fibre ends drastically changes connector losses and the optimal method can be different for each fibre type [5]. In addition, transversal and longitudinal misalignments introduce additional variability in the connector insertion loss that also has an impact in fibre transmission properties. For a single-core step-index (SI) poly-methyl-metha-crylate (PMMA) fibres with high numerical apertures (NAs) misalignment losses have been studied both theoretically and experimentally [6-8]. Multi-core POFs, due to their smaller bending loss, have been considered as a promising candidate for short range applications but the insertion loss of their connectors can be increased by the extra degree of freedom introduced by rotational misalignment. In fact, we found a significant increase in connector losses for MC-POFs relative to SC-POF [5]. The effect of the different misalignments for MC-POFs was measured in [9] for two different launching conditions which were both far from those obtained with commercial sources for POF based networks. Here, we assess misalignment loss for MC-POFs using a standard

source for POFs and taking as a starting point our previous work on single-core POFs. We present a thorough analysis of the rotational misalignment loss alone and combined with other misalignments that can occur when connecting MC-POFs, assessing their relative impacts on the final connector loss. We will try to explain the difference in connector loss between single-core and multi-core POFs by the effect of the rotational misalignment.

The paper is organized as follows: First, we describe the experimental methods. Then, we show our experimental results and compare them to model predictions. Last, we discuss our results focusing on rotational misalignment loss and its impact on connector insertion loss for MC-POFs.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE.

In this chapter, the main properties of the analyzed fibre are enumerated first. Then, the experimental set-up and procedure used to obtain the extra loss induced by rotational, axial and longitudinal misalignments for MC-POF is described.

A. Fibre Description.

In this work, we tested a 1 mm PMMA fibre manufactured by Asahi Kasei: SMCK-1000P [13]. It contains 19 cores with step-index profiles whose distribution is shown in Fig.1. The nominal numerical aperture of this fibre is 0.6. The jacket is made of poly-ethylene with a diameter of 2.2 mm. Its temperature range is -55° to 85°. In Fig.1, the rotational misalignment that is the main focus of this study is illustrated. This type of misalignment appears when using a connector to link two segments of the same MC fibre. If the relative position of the fibres is not the same when installing the connectors and joining them with a double connector, we can incur in extra losses relative to the connector for a single-core fibre.

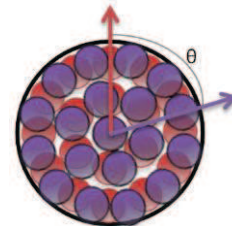


Fig.1. Mismatch of the individual cores due to rotation of the fibre over its axis.

B. Set-up description.

We used the experimental system depicted in Fig.2 developed to measure the extra losses introduced in single-core POFs by longitudinal and axial misalignment and here extended to introduce the rotational misalignment [6]. We used a computer-controlled system based on two motorized micrometers to shift one fibre end relative to the other fibre in the x and z axes. The other fibre end is mounted on a rotary basis perpendicular to its axis that permits to change manually the relative position of the end faces of the fibres (rotational misalignment). The received power is measured with a PM100USB power-meter from ThorLabs [10]. Our source was a 650 nm LED from FOTEC that was connected to the transmitting fibre by a Versalink (VL) [11] connector to resemble as much as possible normal launching conditions. The experiment starts with the two short fibre segments (less than 1 meter) optimally aligned to provide a reference power. The camera [12], that incorporates a mirror at an angle of 45 degrees, is used to align both fibre ends in order to obtain the maximum power. Then, power is measured changing the relative positions of the fibres in one or several of the three parameters: θ (rotational misalignment), x (axial misalignment) and z (longitudinal misalignment) and relative power is calculated as its ratio to the maximum power.

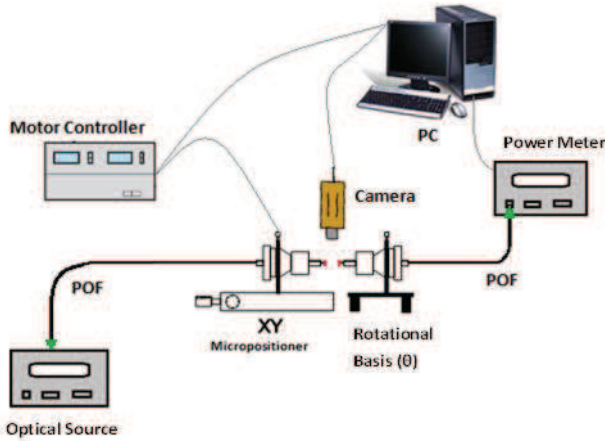


Fig. 2. Experimental set-up to measure power transmitted under axial (x), longitudinal (z) and rotational (θ) misalignments.

III. RESULTS.

In this chapter, we present the measurements obtained using the set-up described before along with the results predicted by simple models. First, we show the variation of loss with the rotation angle and its change for different longitudinal separations. Then, we assess the effect of the axial and longitudinal misalignments alone and combined.

A. Rotational Misalignment.

Fig. 3 shows the power transmitted as a function of the rotation angle for two longitudinal separations along with a model prediction (blue solid line). Power was measured for each angle θ , scanning from 0° to 360° at 4° steps for $x = 0$ and $z = 70 \mu\text{m}$. (as red lines and dots) and $z = 240 \mu\text{m}$ (as green lines and dots). The vertical axis shows power normalized to the maximum power for each case. The first longitudinal separation was chosen to place the fibres as closer as possible avoiding fibre collision. Although the fibre

symmetry allows us to predict a periodic repetition of the same pattern every 30° , we have performed the whole scan in order to have an idea of the variability due to irregularities and lack of symmetry.

The model traditionally used to predict axial misalignment losses can be also applied to rotational misalignment. This model assumes that all the light is evenly distributed in the core and that the transmitted light from one fibre to another is proportional to the area of overlap between the two fibres. As the cores are irregular and to model them as circles would be far from real, we have captured an image of the fibre end injecting light at the other end of the fibre with our source. Based on this near-field pattern the transmitted power was obtained as a function of the relative rotation angle (θ). Power is represented as the ratio of the transmitted power for a given angle (overlapping area) over the maximum transmitted power (total area). The simulation shows the 12 maxima and minima that have slightly different values similar the pattern found in the experimental measurements. These differences in the relative maxima and minima can be explained by the irregularities in the cores shapes, the differences in their spacing, and the lack of uniformity in light distribution [9].

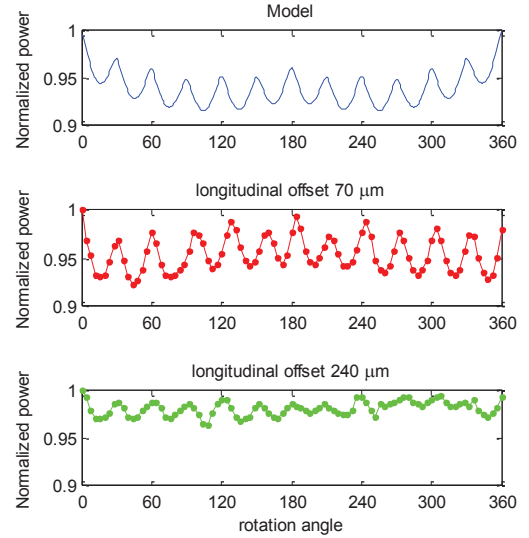


Fig. 3. The upper graph shows the model Prediction. Relative power transmitted as a function of the rotation angle is shown in the middle graph for $70 \mu\text{m}$ of longitudinal offset and in the lower graph $240 \mu\text{m}$.

A comparison between the results for the two different separation shows that longitudinal misalignment tends to smooth the effects of the rotational misalignment. The values are represented normalized to the maximum power to emphasize the variation rather than absolute values. Naturally, the absolute power transmitted for a separation of $240 \mu\text{m}$ (-12.8 dBm) is lower than for $70 \mu\text{m}$ (-12.35 dBm).

B. Axial Misalignment.

The axial misalignment is generally the most restrictive even for relative large optical fibres such as POFs [9] but it can be well predicted using the area model. Thus, in Fig. 4 the experimental results shown as red dots and the model predictions as a black line are represented for this type of misalignment. The relative position of the fibres was changed

from 3 mm to the left to 3 mm to the right in 10 micron steps. The relative angular position of the fibres for this measurement was fixed to that of the absolute maximum power transmission ($\theta = 0^\circ$) and the longitudinal offset was also $z = 70 \mu\text{m}$. The model used to describe the axial misalignment is based on assuming that relative transmitted power is proportional to the ratio of the overlapping area of the two fibre ends and the total fibre area. The multi-core structure of the fibre has been ignored in this model. Thus, the model predictions can be calculated using the following equation (1), where a is the fibre radius whose value is 0.5 mm.

$$P(x, z = 0) = \frac{2}{\pi} \left(\arccos\left(\frac{|x|}{2a}\right) - \frac{|x|}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{|x|}{2a}\right)^2} \right) \quad (1)$$

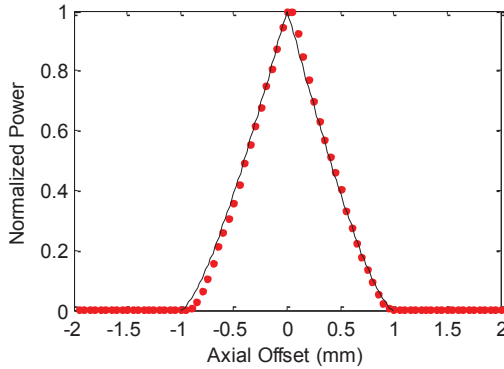


Fig. 4. Axial Misalignment.

Fig.4 shows an excellent agreement of the experimental data and the model predictions. We have obtained the same measurements for the absolute minimum power transmission ($\theta = 15^\circ$) but the curve is identical apart from a small lateral shift so it has not been shown here.

C. Longitudinal Misalignment.

The longitudinal misalignment has been measured starting from $z = 70 \mu\text{m}$ up to 3 mm, scanning in 50 micron steps and is shown in Fig. 5 as red dots. The model for this type of misalignment is based on the light beam expansion given by the fibre NA and the hypothesis of uniform light distribution over the core. Relative transmitted power, shown as a black solid line in Fig. 5, is calculated using the following equation (2), where a is the fibre radius and α is the acceptance angle obtained as $\alpha = \arcsin(NA)$.

$$P(x = 0, z) = \left(\frac{a}{a + z \tan(\alpha)} \right)^2 \quad (2)$$

Fig. 5 illustrates that the model is not very accurate in this case where the predictions are well above the actual measurements.

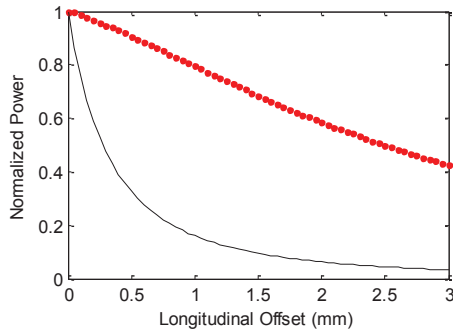


Fig. 5. Longitudinal Misalignment.

E. Combined Axial, Rotational and Longitudinal Misalignments.

Finally, we have made a full scan in the x and z dimensions to obtain a loss surface for a fixed rotational position. Transmitted power was measured for a (x, z) pair scanning x from -3 to 3 mm and z from 0 to 3 mm with the angular positions at 0° . The Fig. 6 shows how, when increasing fibre separation, the axial misalignment has less impact over transmitted power.

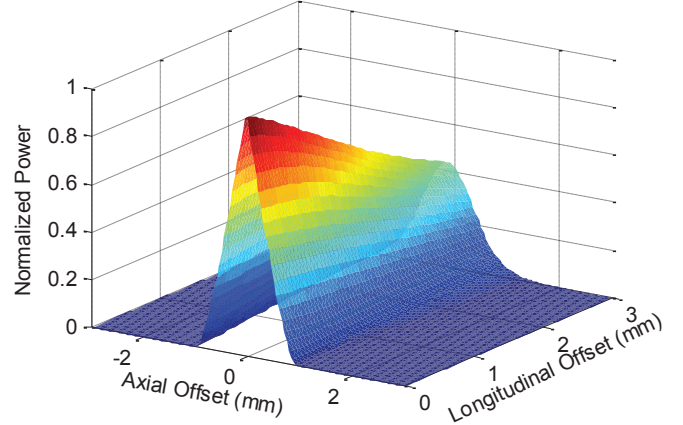


Fig. 6. Combination of Axial, Longitudinal and Rotational Misalignments.

IV. DISCUSSION.

Our results have been compared to those of Berganza et al. [9]. They measured misalignment loss first, injecting light to the central core, and second, covering the whole fibre surface, both with a beam expanded to an aperture of 0.65. We found that our results for axial misalignment loss are very close to theirs while their losses for rotational and longitudinal misalignment are higher than ours. We explain these differences with the difference in launching conditions as when they uniformly illuminate the whole input fibre end surface with a 0.65 aperture while our launching conditions are obtained with a LED that illuminates a narrower area and with a lower aperture. The axial misalignment is mainly driven by fibre size and thus, launching conditions are not decisive as their own results for the two very different launching conditions demonstrate.

We have obtained the variation in power transmission between two MC-POFs when one of them is rotated relative to the other. We found that this rotational misalignment is well represented by a model based on the area of overlap between the fibres that was calculated using a near-field image of one fibre. We found maximum transmitted power when all the cores overlap i.e. every 30° and minimum transmitted power when some of the cores do not coincide in position, for 15° , 45° and so on.

Rotational misalignment may appear easily in the connectorization process where the fibre relative positions are not controlled. In fact, when the fibre is cut and its ends prepared to insert the connectors, they do not have a mark to allow matching of their end faces. Thus, the cores relative positions can take any angular value with maximum, minimum and intermediate power transmission as shown in Fig. 3. Thus, we have estimated the average loss due to random rotational misalignment from the data for $z = 70 \mu\text{m}$

in Fig. 3. This longitudinal separation corresponds approximately to the distance between fibres when using ST connectors. The average rotational loss was 0.45 dB, close to the difference obtained in connector loss between single-core and multi-core fibres which was 0.35 dB [5].

Both rotational and axial misalignments are more critical than the longitudinal misalignment. In fact, Fig. 4 proves that axial misalignment is quite severe, which is expected when you consider that the core diameter of the fibre is 1 mm. On the other hand, axial misalignment may not be as frequent in the process of connectorization as the other types. In addition, the mathematical model for the axial misalignment follows closely the experimental data.

Here, we also show that the effect of both rotation and axial misalignments is reduced with fibre separation but at the cost of further loss. For most connector types, it is not possible to put the fibres in contact and thus, fibre separation is subject to variability. Therefore, longitudinal misalignment is frequent in the process connectorization. Their effects are shown in Fig. 5 where it is clear that the model predicts much higher losses than were experimentally obtained. These discrepancies could be attributed to the fact that the nominal NA obtained from the characteristics sheets has been used in the calculations. In addition, the predictions could be improved modifying an approach that was successfully applied to the modelling of misalignment losses for single-core fibres and that is based in the changes through propagation of the fibre output power distribution [6].

V. CONCLUSIONS

This paper provides a survey of rotational, axial and longitudinal misalignments in a 19 core plastic optical fibre from SMCK-1000 Asahi Kasei. Experimental measurements are presented along with model predictions. Our results are consistent with rotational misalignment being the main factor under the increase found in connector loss for multi-core relative to single-core POFs. We found that rotational and axial misalignments are the most critical in the process of connectorization but that they can be well described by a simple model based on taking the power transmitted from one fibre to another as proportional to their overlap area. On the other hand, the model for longitudinal misalignments, which are always present in connectors, needs to be improved as their results are far from the measurements.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Spanish government under Grant TEC2012-37983-C03-03. Particularly, we want to thank Asahi Kasei and their representatives in Europe, Sojitz Europe PLC for supplying the MSCK1000 fibre.

REFERENCES

- [1] A. Esteban, M.A. Losada, J. Mateo, N. Antoniadis, A. López, and J. Zubia, "Effects of Connectors in SI-POFs Transmission Properties Studied in a Matrix Propagation Framework", in *Proc. of 20th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application 2011*, Bilbao, Spain, September 2011.
- [2] E. Grivas, D. Sivridis, and 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.
- [3] N. Antoniadis, M. A. Losada, J. Mateo, D. Richards, T. K. Truong, X. Jiang, and N. Madamopoulos, "Modeling and Characterization of SI-POF and Connectors for Use in an Avionics System", in *Proc. of 20th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application 2011*, Bilbao, Spain, September 2011.
- [4] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos, "Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 3, 468-475, 2013.
- [5] M. A. Losada, F. A. Domínguez-Chapman, J. Mateo, A. López, J. Zubia, "Influence of Termination on Connector Loss for Plastic Optical Fibres", in *Proc. of International Conference on Transparent Optical Networks 2014*, Graz, Austria, July 2014.
- [6] J. Mateo, M. A. Losada, N. Antoniadis, D. Richards, A. López, and J. Zubia, "Connector Misalignment Matrix Model", in *Proc. of 21th International Conference on Plastic Optic Fibres and Application 2012*, Atlanta, US, September 2012.
- [7] S. Werzinger, C.-A. Bunge, S. Loquai, O. Ziemann, "An Analytic Connector Loss Model for Step-Index Polymer Optical Fiber Links", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 16, 2769-, 2776.
- [8] S. Werzinger, C.-A. Bunge, S. Loquai, O. Ziemann, "Application and Experimental Evaluation of an Analytical Connector Loss Model for SI-POF"
- [9] A. Berganza, G. Aldabaldeireku, J. Zubia, G. Durana, and J. Arrue, "Misalignment Losses in Step-Index Multicore Plastic Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, V. 31, No. 13, 2013
- [10] *PM100USB - USB Power and Energy Meter Interface* Available at: <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=PM100USB> (Accessed: 31 March 2014).
- [11] *VersaLink POF* Available at: <http://www.i-fiberoptics.com/patchcords.php?id=1> (Accessed: 12 March 2014).
- [12] *Dino-Lite Digital Microscope* Available at: <http://www.dino-lite.com/> (Accessed: 15 March 2014).
- [13] *Multicore POF* Available at: <http://www.asahi-kasei.co.jp/ake-mate/pof/en/product/multi-core.html> (Accessed: 3 March 2014).

Al Lector:

*Gracias por el tiempo dedicado a la lectura de este trabajo.
Esperamos que haya sido de su agrado y beneplácito.*

