



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de un sistema experimental para medidas
de campo cercano en fibras ópticas de plástico
multinúcleo

Autor

Manuel Chueca Lázaro

Directora

M^a Ángeles Losada Binué

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2015

Índice de contenidos

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 7 |
| 1.1 Motivación..... | 7 |
| 1.2 Objetivos del proyecto..... | 7 |
| 1.3 Estructura de la memoria..... | 8 |
| 2. Estado del arte..... | 11 |
| 2.1 Evolución histórica de las Fibras Ópticas de Plástico..... | 11 |
| 2.2 Estructura de las fibras ópticas | 12 |
| 2.2.1 FOP-SI..... | 13 |
| 2.2.2 FOP-IG..... | 14 |
| 2.2.3 FOP-MN..... | 14 |
| 2.3 Medidas en FOP..... | 15 |
| 2.3.1 Medidas en campo cercano..... | 15 |
| 2.3.2 Medidas en campo lejano..... | 16 |
| 2.4 Aplicaciones de las FOP..... | 18 |
| 3. Montaje del escenario..... | 19 |
| 3.1 Inyección..... | 19 |
| 3.2 Registro de campo cercano..... | 21 |
| 3.3 Registro de campo lejano..... | 22 |
| 4. Desarrollo del software de análisis de campo cercano..... | 24 |
| 4.1 Pre-procesado de la imagen..... | 25 |
| 4.2 Algoritmo de Canny..... | 26 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.1 | Filtrado gaussiano de ruido..... | 27 |
| 4.2.2 | Detección de gradientes..... | 28 |
| 4.2.3 | Seguimiento de contornos por histéresis..... | 29 |
| 4.2.4 | Supresión de gradientes no máximos..... | 30 |
| 4.3 | Procesado morfológico..... | 31 |
| 4.3.1 | Cierre morfológico..... | 33 |
| 4.3.2 | Apertura de área..... | 33 |
| 4.3.3 | Relleno de formas..... | 34 |
| 4.4 | Extracción de características..... | 35 |
| 5. | Medidas experimentales..... | 36 |
| 5.1 | Protocolo experimental..... | 36 |
| 5.2 | Diáfonía en FOP-MN..... | 37 |
| 5.3 | Atenuación relativa en la FOP-MN..... | 40 |
| 5.3.1 | Atenuación relativa entre núcleos..... | 40 |
| 5.4 | Apertura numérica de los núcleos..... | 45 |
| 5.5 | Discusión de los resultados..... | 48 |
| 6. | Conclusiones..... | 51 |
| 6.1 | Ánalisis cualitativo..... | 51 |
| 6.2 | Líneas futuras..... | 52 |
| | Referencias..... | 54 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Estructura de una fibra óptica..... | 12 |
| Figura 2.2 Vista longitudinal de una fibra óptica SI por donde se propaga un rayo de luz..... | 13 |
| Figura 2.3 Vista longitudinal de una fibra óptica IG por donde se propaga un rayo de luz..... | 14 |
| Figura 2.4 Sección transversal de una FOP-MN de 37 núcleos..... | 14 |
| Figura 2.5 Disposición de la cámara para el registro del campo cercano..... | 15 |
| Figura 2.6. Patrón de campo cercano de una FOP-SN captado mediante un LEPAS-12..... | 16 |
| Figura 2.7 Disposición de la cámara para el registro del campo lejano..... | 17 |
| Figura 2.8. Patrón de campo lejano obtenido mediante un LEPAS-12 en función de los ángulos de aceptancia en ejes XY..... | 17 |
| Figura 3.1 Esquema del sistema de inyección desde el láser He-Ne hasta la FOP-MN, utilizando una fibra óptica de vidrio monomodo auxiliar para controlar la inyección en la fibra de plástico..... | 19 |
| Figura 3.2 Imagen captada por la cámara CCD utilizada para el control de la inyección desde la fibra de vidrio monomodo hasta la FOP-MN..... | 20 |
| Figura 3.3 Vista cenital del sistema de inyección desde la fibra de vidrio monomodo hasta la FOP-MN, así como de la cámara CCD utilizada para el control de ésta..... | 21 |
| Figura 3.4 Esquema del sistema de registro del campo cercano utilizado..... | 21 |
| Figura 3.5 Vista lateral del sistema de registro de campo cercano utilizado..... | 22 |
| Figura 3.6 Esquema del sistema de registro de campo lejano utilizado..... | 23 |
| Figura 3.7 Vista cenital del sistema de registro de campo lejano utilizado..... | 23 |
| Figura 4.1 Diagrama completo de flujo del software propuesto..... | 24 |
| Figura 4.2 (a) Imagen en escala de grises captada por la cámara CCD utilizada para el registro del campo cercano; (b) Imagen automáticamente centrada en la zona de interés, que será la entrada del algoritmo..... | 25 |
| Figura 4.3 (a) Matriz 'dx', resultante de aplicar un filtrado gaussiano derivativo en el eje 'x'; (b) Matriz 'dy', resultante de aplicar un filtrado gaussiano derivativo en el eje 'y'..... | 27 |
| Figura 4.4 Matriz 'm' de magnitudes de los gradientes, resultante de aplicar la ecuación 4.5 sobre las matrices 'dx' y 'dy'..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.5 Imagen resultante de aplicar el algoritmo completo de Canny sobre la imagen de entrada al programa, y que posteriormente será la entrada del algoritmo de procesado morfológico..... | 30 |
| Figura 4.6 Proceso de dilatación de una región determinada de una imagen: (a) Región de entrada al algoritmo de dilatación; (b) Elemento estructural utilizado en el proceso de dilatación; (c) Región de salida..... | 32 |
| Figura 4.7 Proceso de erosión de una región determinada de una imagen: (a) Región de entrada al algoritmo de erosión; (b) Elemento estructural utilizado en el proceso de erosión; (c) Región de salida..... | 32 |
| Figura 4.8 Primera iteración del bucle: (a) Imagen de salida del algoritmo de Canny, que será la entrada del algoritmo de procesado morfológico; (b) Imagen resultante tras la primera iteración..... | 34 |
| Figura 4.9 (a) Imagen binaria de salida tras completar el número necesario de bucles de procesado morfológico; (b) Imagen binaria final que servirá como máscara, con regiones conexas positivas y aisladas que definirán los núcleos..... | 34 |
| Figura 4.10 Imagen correspondiente a la máscara final, donde los núcleos han sido identificados y numerados individualmente..... | 35 |
| Figura 5.1 Fragmento de imagen captada por la cámara CCD en campo cercano inyectando por un núcleo del primer anillo, donde se aprecia el efecto contaminante del speckle y la apertura de haz en núcleos adyacentes al iluminado..... | 37 |
| Figura 5.2 Medidas realizadas sobre un tramo de FOP-MN de 25 metros: (a) Potencia por núcleos inyectando por el núcleo central; (b) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del primer anillo; (c) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del segundo anillo..... | 38 |
| Figura 5.3 (a) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del primer anillo en un tramo de 50 metros; (b) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del segundo anillo en un tramo de 84 metros..... | 39 |
| Figura 5.4 Porcentaje de potencia por núcleos respecto del núcleo de mayor potencia inyectando individualmente por cada uno de ellos en tramos de: (a) 25 metros; (b) 50 metros; (c) 84 metros..... | 41 |
| Figura 5.5 Potencia por núcleos respecto del núcleo de mayor en tramos de 1 metro realizando el método de <i>cut-back</i> a los anteriores tramos de: (a) 25 metros; (b) 50 metros; (c) 84 metros..... | 42 |
| Figura 5.6 Pérdidas en dB de los núcleos de la FOP-MN respecto al núcleo de mayor potencia para tramos de: (a) 50 metros; (b) 84 metros..... | 43 |
| Figura 5.7 Reconstrucción en escala de grises de la iluminación de los núcleos según los valores de potencia obtenidos para tramos de: (a) 25 metros; (b) 50 metros; (c) 84 metros..... | 44 |
| Figura 5.8 Perfil radial de tres núcleos pertenecientes al centro de la fibra, al primer anillo y al segundo anillo..... | 46 |

Figura 5.9 Aperturas numéricas de cada núcleo, medidas individualmente en cada uno de ellos.....46

Figura 5.10 Perfil radial de la FOP-MN, inyectando por todos los núcleos y midiéndolos en conjunto.....47

1 Introducción

1.1 Motivación

El uso de fibra óptica de vidrio como medio de comunicación ha cambiado por completo el concepto de transmisión guiada de información a larga distancia en las últimas décadas. Sin embargo, para cubrir distancias más cortas en entornos cerrados, se trabaja en la actualidad con fibras de materiales plásticos que presentan las ventajas de su fácil manejo, haciendo posible su uso con dispositivos de bajo coste, y su poca sensibilidad a las curvaturas.

El grupo de investigación de comunicaciones ópticas de la Universidad de Zaragoza cuenta con una amplia experiencia en el campo de las fibras de plástico, desarrollando modelos de propagación y entornos de simulación, poniendo a punto sistemas de caracterización de parámetros de transmisión y diseñando redes de comunicaciones basadas en estas fibras. Sin embargo, hasta ahora estos trabajos se han centrado en un tipo de fibra de plástico muy concreto, de 1 mm de diámetro y un solo núcleo con un perfil de salto de índice. En el presente, el grupo está comenzando a trabajar con otro tipo de fibras de plástico que cuentan con varios núcleos, o fibras multinúcleo. Por este motivo es de interés potenciar este campo, aportando nuevas herramientas adaptadas al estudio y caracterización de las propiedades de este tipo de fibras con las que no se ha trabajado hasta ahora. El hecho de crear un sistema de medida nuevo y a la vez compatible con los ya disponibles en el laboratorio permite aumentar en gran medida el rango de posibilidades tanto de éste último como de los ya existentes, dando pie a nuevos proyectos.

1.2 Objetivos del proyecto

Se plantea el desarrollo de un sistema experimental para la obtención de imágenes de campo cercano de fibras de plástico multinúcleo de 1 mm de diámetro total, así como la realización de un software para su análisis detectando la posición y forma de cada uno de los núcleos y tratándolos de manera independiente para la extracción de características.

Con el sistema desarrollado se pretende realizar diferentes medidas sobre una fibra multinúcleo de 19 núcleos, caracterizando efectos como la transferencia de potencia

entre ellos e integrando este nuevo método en el conjunto de herramientas con las que cuenta el laboratorio.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria presentada se estructura en diferentes capítulos tratando temáticas o etapas bien diferenciadas del proyecto. Así mismo consta de diferentes anexos complementando los capítulos anteriores, mostrados en la parte final del documento. Tanto el contenido de los capítulos como el de los anexos se detallan a continuación:

- *Capítulo 1: Introducción*

Se habla de la motivación para llevar a cabo el proyecto, se mencionan los objetivos de éste y se describe la estructura de la memoria.

- *Capítulo 2: Estado del arte*

Se explica el contexto en el que el proyecto es llevado a cabo, comenzando por la evolución de las comunicaciones ópticas a lo largo de la historia hasta el presente. De la misma manera se enumeran y describen brevemente tanto los tipos de fibra óptica existentes en la actualidad como los sistemas de medida y parámetros que los caracterizan, haciendo énfasis en los que van a ser utilizados en la parte experimental del trabajo. Por último se mencionan algunas de las aplicaciones para las cuales se utiliza el tipo de fibra analizado, y a las cuales se hará referencia a lo largo de la memoria relacionando en todo momento los resultados obtenidos con su aplicación en sistemas reales.

- *Capítulo 3: Montaje del escenario*

Se describe detalladamente y por etapas el escenario utilizado para la toma de medidas. Es el paso previo al desarrollo del software ya que es necesario contar con muestras de las imágenes con las que se va a trabajar para empezar a programar. Este capítulo cuenta con la descripción del sistema de inyección a la fibra de plástico, del sistema de registro de campo cercano y del sistema de registro de campo lejano.

- *Capítulo 4: Desarrollo del software de análisis de campo cercano*

En este capítulo se explica el desarrollo del software de análisis de manera estructurada, abordando desde el pre-procesado de la imagen hasta la extracción de características una vez se ha definido correctamente el patrón final de la forma de la fibra. El programa propuesto se basa en un procesado morfológico a partir del gradiente

obtenido de la imagen captada por medio del algoritmo de Canny. Los pasos intermedios del algoritmo se ilustran mediante resultados parciales.

- *Capítulo 5: Medidas experimentales*

Se propone inicialmente un protocolo experimental con el objetivo de definir un escenario y unas condiciones de toma de medidas, y se explican los resultados extraídos de éstas tanto en campo cercano como en campo lejano a partir del programa desarrollado en el capítulo anterior. Además se buscan relaciones entre las problemáticas surgidas a la hora del análisis de los resultados y las características de la fibra, llegando a ciertas conclusiones explicadas en el apartado final donde se realiza una discusión.

- *Capítulo 6: Conclusiones*

Se realiza un análisis cualitativo de la totalidad del trabajo, así como un comentario acerca de las líneas futuras prácticas y de investigación que se pueden seguir a partir de este estudio.

- *Anexo I: Efectos limitantes de la fibra óptica*

Se explican detalladamente los fenómenos de atenuación y dispersión en una fibra óptica, limitantes en este medio de transmisión y que serán de gran importancia en el transcurso de la memoria.

- *Anexo II: Efecto de diafonía entre núcleos de una FOP-MN o crosstalk*

Se describe el efecto de transferencia de potencia entre núcleos cercanos de una misma fibra multinúcleo.

- *Anexo III: Laser Beam Profiler LEPAS-12*

Se presenta la hoja de características del *LEPAS-12*.

- *Anexo IV: Fibra de vidrio monomodo de visible utilizada en inyección*

Se presenta la hoja de características de la fibra monomodo utilizada.

- *Anexo V: FOP-MN utilizada*

Se presenta la hoja de características de la fibra de plástico multinúcleo utilizada y analizada.

- *Anexo VI: Software utilizado para el registro del campo lejano*

Se realiza una descripción de la interfaz gráfica del software utilizado para el registro el campo cercano, explicando las posibilidades que éste ofrece y su funcionamiento.

- *Anexo VII: Preparación de los extremos de la fibra*

Se describe el procedimiento seguido para la preparación de los extremos de las fibras ópticas utilizadas en el apartado experimental del proyecto, tanto de vidrio como de plástico.

2 Estado del arte

2.1 Evolución histórica de las Fibras Ópticas de Plástico

La primera referencia de transmisión de información mediante rayos de luz data de 1880 [1], cuando Graham Bell hizo uso de una serie de espejos y detectores de selenio para transmitir ondas sonoras en un aparato que se denominó *fotófono*. Sin embargo y pese a las patentes en 1930 de J.L. Baird y C. W. Hansell para barrer y transmitir imágenes de televisión a través de cables de fibra sin cubierta, a comienzos del S.XX este sistema de comunicación tan solo se consideraba un juguete y sus aplicaciones prácticas eran nulas.

No fue hasta 1951 cuando C.S. van Heel, H. H. Hopkins y N. S. Kapany trabajaron con haces de fibras desarrollando el fibroscopio flexible, todavía utilizado hoy en el campo de la medicina. La invención del láser en 1960 supuso un cambio de concepto a la hora de enviar información debido a su aumento en potencia óptica emitida, en el rango de frecuencia y ante todo a su capacidad para transmitir un mayor ancho de banda. Así, en 1967 K. C. Kao y G. A. Bockham propusieron un nuevo sistema de comunicaciones utilizando fibra revestida, más similar a la que ahora se conoce y con pérdidas competitivas respecto a otros medios de transmisión [2]. En el mismo año Dupont creó la primera fibra óptica de plástico uninúcleo (FOP-SI), el cual estaba fabricado de polimetilmetacrilato (PMMA), pero con unas pérdidas de en torno a 1000 dB/km que hacían inviable la transmisión a larga distancia. Pese a ello este tipo de fibra despertó el interés de Mitsubishi Rayon, que adquirió la patente, y de Asahi Chemical y Toray, que también entraron en el mercado.

En 1970, un equipo perteneciente a Corning Glass Works en Corning, Nueva York, desarrolló una fibra óptica de vidrio cuyas pérdidas rondaban los 2 dB/km [3]. Fue el avance más significativo en la historia de este medio de transmisión ya que posibilitaba la transmisión a grandes distancias, y desde este momento hasta la actualidad su crecimiento ha sido exponencial. Paralelamente, la atenuación de la FOP ha ido disminuyendo hasta aproximadamente los 0.2 dB/m actuales gracias a los avances de la mano de importantes empresas como la japonesa Asahi Glass o instituciones como la también nipona Universidad de Keio [4, 5].

Hoy en día la fibra óptica está a la cabeza en comunicaciones de alta velocidad, y se ha convertido en el medio más utilizado a la hora de trazar redes transoceánicas debido a su alta capacidad de transmisión y a su baja atenuación. En los últimos años, las fibras están acercándose cada vez más al usuario introduciéndose como medio de transmisión en automóviles, trenes, aviones y dentro del hogar. Es en estas aplicaciones donde las ventajas de las fibras ópticas de plástico son más evidentes a la par que su

mayor atenuación y menor ancho de banda no comprometen los requerimientos necesarios. Por ello, en la actualidad se investiga en técnicas avanzadas de transmisión que permitan aumentar su eficiencia como son la ecualización electrónica [6] o la multiplexación por división espacial en una misma fibra de plástico multinúcleo (FOP-MN).

2.2 Estructura de las fibras ópticas

Entendemos como fibra óptica una guía de ondas cilíndrica, dentro de la cual se transmite luz guiada. Esta luz viaja por la capa más interna, denominada núcleo, cuyo índice de refracción puede ser de tipo salto de índice (SI), gradual (IG) o multiescalón (IME), como se verá en los siguientes apartados. Las capas restantes se denominan revestimiento, con índice de refracción constante menor que el del núcleo para impedir que la luz escape de éste, y cubierta, que protege a la fibra ante factores externos y le da robustez como se aprecia en la Figura 2.1:

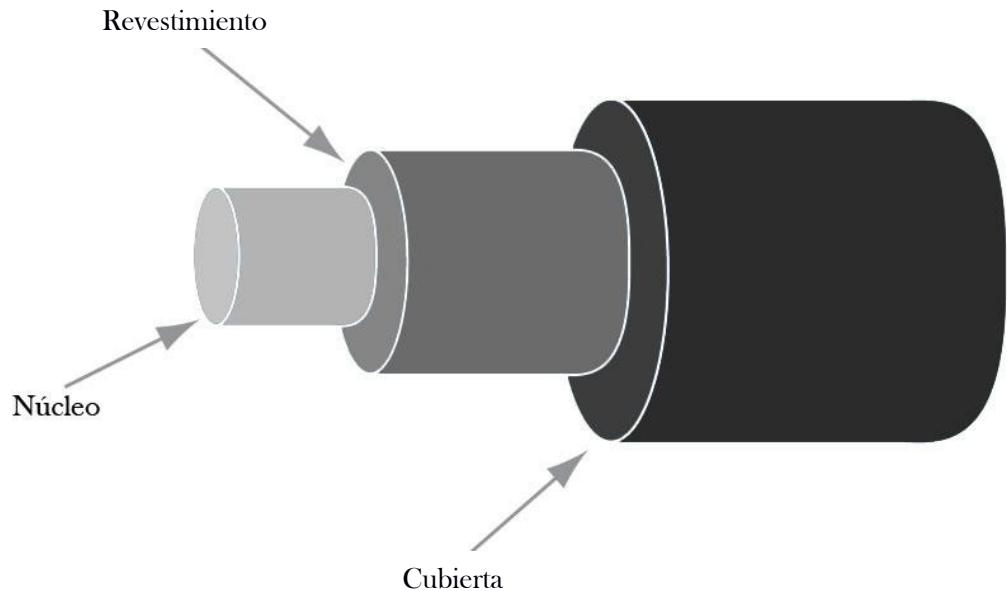


Figura 2.1 Estructura de una fibra óptica

Por norma general, una fibra óptica puede ser de vidrio (FOV) o de plástico (FOP). En el primer caso el radio del núcleo oscila entre 3 y 25 μm , mientras que en el caso de una FOP lo hace entre 125 y 490 μm .

Esta variable, junto con el perfil de índices de refracción comentados anteriormente, define que el comportamiento de una fibra sea monomodal o multimodal. Una fibra óptica será monomodo si por ella se transmite tan solo el modo fundamental (HE_{11}), mientras que en el caso de transmitirse más de un modo se hablará

de una fibra multimodo [7]. El comportamiento de una fibra se define mediante la frecuencia normalizada V , definida según la Ecuación 2.1:

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_n^2 - n_r^2} \quad (2.1)$$

donde ρ es el radio del núcleo de la fibra, λ la longitud de onda de la luz transmitida, n_n el índice de refracción del núcleo y n_r el índice de refracción del revestimiento. Se fija el umbral de la frecuencia normalizada en $V=2,405$. Para un valor menor que este umbral, las ecuaciones de Maxwell dispondrán solo de una solución y por tanto tan solo se propagará el modo fundamental, siendo la frecuencia de corte de los siguientes (TE₀₁ y TM₀₁) el umbral ya descrito. Si por el contrario el valor de la frecuencia normalizada es mayor, las ecuaciones de Maxwell tendrán más de una solución y serán varios modos los que se propaguen por la fibra, dependiendo de las características de ésta. En el caso de las fibras ópticas de plástico, debido a su gran tamaño y amplia apertura, el número de modos que son capaces de transmitir es del orden de millones.

2.2.1 FOP-SI

En este tipo de fibras, el índice de refracción del núcleo es uniforme en todo su espacio, así como el del revestimiento, siendo el segundo sensiblemente mayor de forma que el haz quede guiado de la mejor manera posible como se observa en la Figura 2.2:

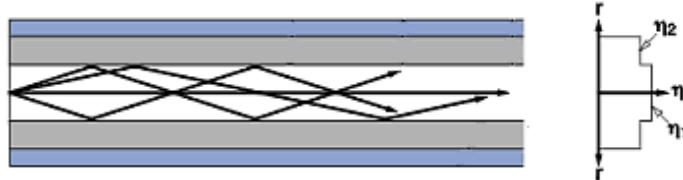


Figura 2.2 Vista longitudinal de una fibra óptica SI por donde se propaga un rayo de luz

La diferencia fijada entre dichos valores de índice de refracción en el diseño de la fibra se traduce en un compromiso entre facilidad para la inyección de luz, atenuación, ancho de banda y velocidad de transmisión. Una diferencia notable entre ambos establecerá una alta apertura numérica (AN), que derivará en una mayor captación de luz pero también limitará el ancho de banda y la velocidad de transmisión. Un valor típico de AN es 0,5.

2.2.2 FOP-IG

En una fibra de índice gradual el índice de refracción varía progresivamente en función del radio de la fibra, siendo ligeramente mayor en el centro de ésta, como muestra la Figura 2.3:

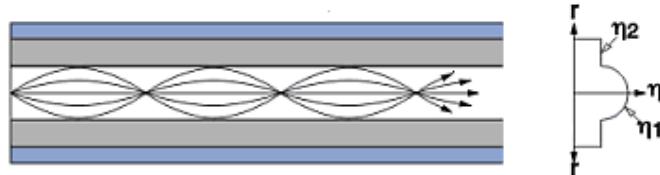


Figura 2.3 Vista longitudinal de una fibra óptica IG por donde se propaga un rayo de luz

Así se consigue reducir notablemente el efecto de la dispersión modal, producida por el retardo entre rayos derivado de la diferencia de caminos entre ellos. Los haces recorren un camino más parecido debido a la variación del índice de refracción, que dificulta que estos lleguen a propagarse en la zona más externa del núcleo. Con este tipo de fibras de baja dispersión modal es posible conseguir mayores anchos de banda que con FOP-SI, así como mayores velocidades de transmisión [8]. Un valor típico de AN para FOP-IG es 0,2, empeorando de esta forma ciertas prestaciones en términos de facilidad de inyección.

2.2.3 FOP-MN

Las fibras ópticas de plástico multinúcleo están formadas por varios núcleos, que se disponen ordenados por anillos alrededor de un núcleo central, como se aprecia en la Figura 2.4:

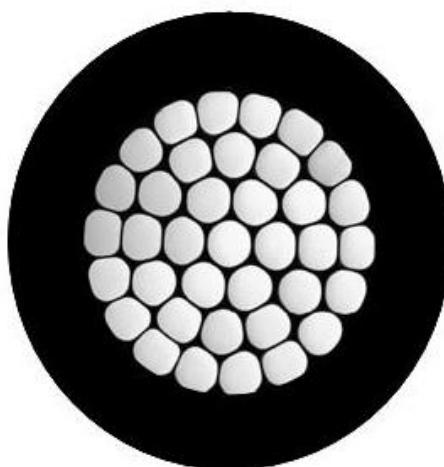


Figura 2.4 Sección transversal de una FOP-MN de 37 núcleos

Estos núcleos están rodeados por revestimiento, manteniéndose la cubierta como protección externa. El tamaño de una FOP-MN es similar al de una FOP convencional, por lo que sus núcleos son de menor tamaño dependiendo de su número. El decrecimiento del radio de los núcleos en una FOP-MN se traduce en menores pérdidas por curvatura, ya que el radio de la curvatura es comparativamente mayor.

2.3 Medidas en FOP

En una FOP, al igual que en una fibra óptica de vidrio, se pueden realizar medidas de parámetros básicos como la atenuación, la dispersión o el ancho de banda, explicados con más detalle en el Anexo I. En este apartado se describen las medidas de la distribución de la luz que sale de la fibra tanto cerca de su extremo (campo cercano) como a una distancia suficientemente alejada de él (campo lejano) ya que son fundamentales en el desarrollo de este proyecto.

2.3.1 Medidas en campo cercano

Se dice que una medida está tomada en campo cercano cuando es realizada a una distancia de la fibra comparable al diámetro del núcleo de ésta. Un ejemplo de este tipo de medidas es la de la atenuación, para la cual situamos un sensor en una posición muy cercana a la punta de la fibra.

Para la medición del campo cercano refractado se utilizan distintas técnicas [9] entre las cuales, la más habitual es la basada en una cámara CCD, que captura de manera directa la distribución de intensidad de la luz como muestra la Figura 2.5:

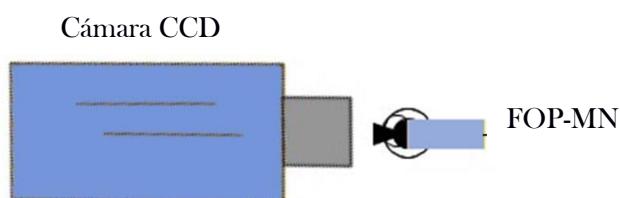


Figura 2.5 Disposición de la cámara para el registro del campo cercano

A partir de dicha distribución de intensidad se pueden medir tanto parámetros estructurales (tamaño y forma del núcleo o cubierta, etc) como fenómenos como la diafonía o transferencia de potencia entre núcleos, explicada en el Anexo II.

Actualmente existen dispositivos en el mercado capaces de automatizar este proceso, detectando tanto la potencia de los núcleos como la diafonía entre ellos. Un ejemplo de este tipo es el LEPAS-12 (Anexo III), compuesto de un sistema de lentes controlado por dos cámaras de alta resolución y apoyado en un software especializado lanzado por *Hamamatsu*, capaz de determinar el diámetro del haz y la distribución de potencia en la fibra. La figura 2.6 muestra el patrón de campo cercano de una FOP-SN captado mediante este sistema:

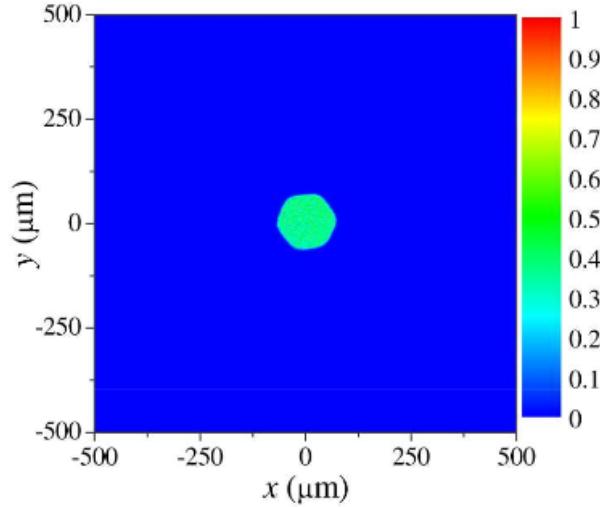


Figura 2.6. Patrón de campo cercano de una FOP-SN captado mediante un LEPAS-12.

Sin embargo su precio es muy alto, y además su uso queda restringido a aplicaciones muy específicas. Es por ello que en este proyecto se desarrolla un método experimental de registro de campo cercano basado en elementos de uso general y relativamente bajo coste y que además es más flexible para poderlo adaptar a distintas fibras y medidas.

2.3.2 Medidas en campo lejano

Se dice que una medida está tomada en campo lejano cuando es realizada a una distancia de la fibra grande en comparación al diámetro del núcleo de ésta. Por norma general se sitúa la fibra frente a un plano a una distancia determinada, y se analiza el patrón reflejado por la luz incidente en éste. Con esta disposición se trata de medir el patrón de campo lejano (FFP), es decir, la distribución de potencia en función de los ángulos con los que sale de la fibra. En la Figura 2.7 se ilustra este procedimiento:

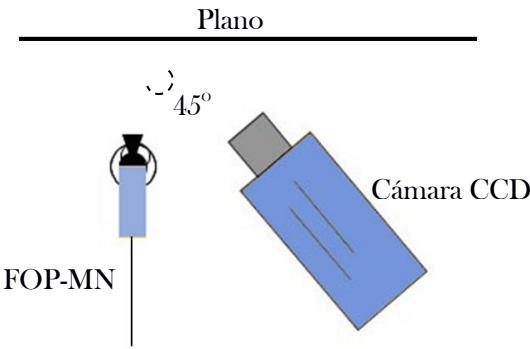


Figura 2.7 Disposición de la cámara para el registro del campo lejano

Una vez se dispone del patrón de campo lejano es posible obtener fácilmente otros parámetros como el perfil lineal, el perfil radial y la AN, que se obtiene a partir del segundo y de la distancia a la que hemos dispuesto la fibra del plano. La dependencia angular del campo lejano fija el ángulo de aceptancia como el ángulo del perfil radial para el cual la potencia cae al 1% de su valor máximo, definiéndose la AN como su seno. Las medidas para determinar la AN se realizan conforme el modelo propuesto por el estándar JIS C6862 [9].

La Figura 2.8 muestra, análogamente al apartado anterior, el patrón de campo lejano de una FOP-SN captado mediante un LEPAS-12:

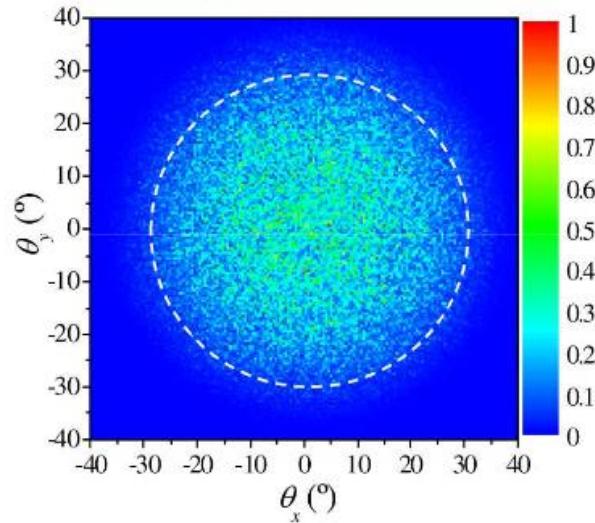


Figura 2.8. Patrón de campo lejano obtenido mediante un LEPAS-12 en función de los ángulos de aceptancia en ejes XY.

2.4 Aplicaciones de las FOP

Las propiedades de las FOP respecto a las FOV son muy diferentes, por lo que sus campos de aplicación también difieren. La mayor atenuación de la FOP hace de ella un medio inviable para comunicaciones a larga distancia pero sin embargo no es un problema para comunicaciones a corta e incluso media distancia, manteniendo todas las características con las que contamos a la hora de trabajar con fibras ópticas.

La ventaja más notable de las FOP son sus bajas pérdidas por curvatura, en contraste a las FOV, cuyas pérdidas producidas por macrocurvaturas la hacen poco viable para aplicaciones domésticas o en entornos cerrados y reducidos [8]. Así, uno de los principales usos de la FOP es como medio de transmisión de datos en redes locales, de automoción e industriales, donde en distancias cortas se requiere que la fibra se adapte al entorno sin pérdida de información.

Su aplicación como sensor en el campo de la medicina es también amplia, sobre todo en lo referente a la monitorización de factores como la presión [10], donde ésta determina la cantidad de intensidad de luz que viaja dentro de la FOP. Para este tipo de aplicaciones es interesante el uso de FOP-MN, ya que su capacidad de detección no se limita tan solo a la intensidad de luz que se recibe sino que también puede identificar la posición del objetivo en función de cómo estén iluminados los núcleos individualmente e incorporar referencia y calibración del sensor con una sola fibra.

Así mismo, su uso como elemento de apoyo en sensores biológicos es también importante, siendo esta fibra un punto de luz flexible y adaptativo para cualquier tipo de inspección o examen en zonas de difícil acceso, como ocurre en las endoscopias [12].

3 Montaje del escenario

En este apartado se describe de manera detallada y por etapas el proceso de montaje del escenario donde se han realizado las medidas, así como la función de cada una de ellas y los diferentes resultados que se pueden obtener combinándolas. La obtención de imágenes válidas es previa al procesado que se describe en el apartado 4 y que puede adaptarse a distintos tipos de fibras o la extracción de diferentes parámetros. El proceso de obtención del campo cercano se ha dividido en tres etapas: inyección, que comprende el procedimiento por el cual se inyecta la luz desde un láser hasta cada uno de los núcleos de la FOP-MN; registro de campo cercano, consistente en la captación de imágenes a la salida de la fibra; y registro de campo lejano, donde se evalúa la reflexión en una superficie uniforme del haz procedente de la FOP-MN.

3.1 Inyección

En esta etapa se describe el proceso de inyección de luz en cada uno de los núcleos de la FOP-MN. Para ello, se ha utilizado como fuente un láser polarizado de He-Ne. El hecho de ser polarizado es fundamental para este tipo de medidas, ya que en el láser despolarizado el estado de polarización cambia periódicamente variando ligeramente la intensidad registrada en recepción, y alterando notablemente los resultados.

La Figura 3.1 ilustra con un esquema el sistema de inyección en la FOP-MN que se ha planteado:

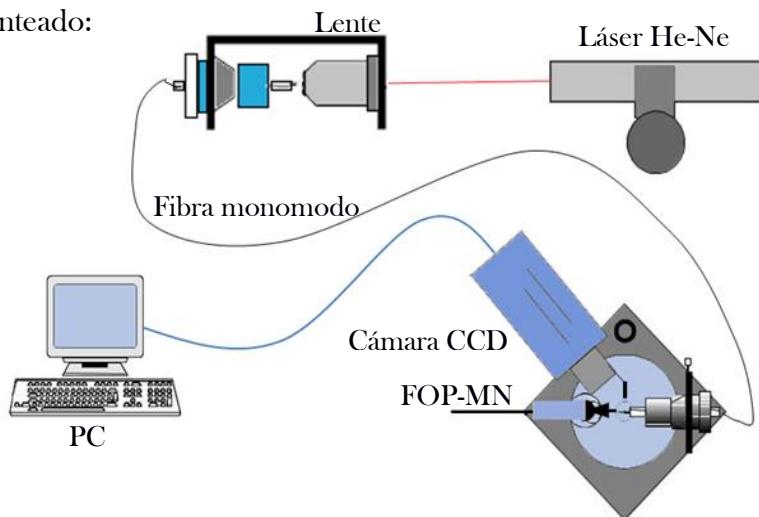


Figura 3.1 Esquema del sistema de inyección desde el láser He-Ne hasta la FOP-MN, utilizando una fibra óptica de vidrio monomodo auxiliar para controlar la inyección en la fibra de plástico.

Para la inyección en los núcleos de la FOP-MN se ha hecho uso de una fibra óptica de vidrio diseñada para comportarse como monomodo en la región del visible (*Corning RGB 400*, Anexo IV). La inyección desde el láser de He-Ne (que emite en 635 nm) hasta la monomodo se realiza mediante un sistema convencional utilizando un objetivo de microscopio y un soporte con control de movimiento XYZ para alinear la fibra. El otro extremo de esta fibra auxiliar se enfrenta de forma precisa y controlada para inyectar el haz en la zona deseada de la FOP-MN (*SMCK 1000P*, Anexo V). El tamaño y apertura de la FOV monomodo asegura que solo se inyecte luz en uno de los núcleos de la FOP-MN si se sitúa suficientemente cerca de ésta.

La inyección desde la FOV hasta la FOP-MN se realiza enfrentando los extremos de ambas fibras a la menor distancia posible, controlando la movilidad del extremo de la FOV en los ejes horizontal y vertical con un soporte micrométrico de manera que podamos desplazar la inyección sobre la superficie de la FOP-MN. Esta inyección se visualiza mediante una segunda cámara CCD (*Dino-Lite Pro*, 1.3 Mpixel, 30 fps), que si bien no aporta ninguna imagen relevante a la hora de extraer información, nos permite realizar un control a tiempo real de la posición del haz proyectado por la fibra de inyección sobre la FOP-MN bajo análisis. Esta cámara se sitúa en un ángulo de 45° respecto al eje longitudinal de la FOP-MN, de manera que el plano de inyección se refleje en un espejo acoplado a ella y la imagen se visualice de manera correcta.

La Figura 3.2 muestra la imagen captada por la cámara anteriormente mencionada, desde donde se puede apreciar tanto la zona en la que incide el haz como la distancia entre ambas fibras.

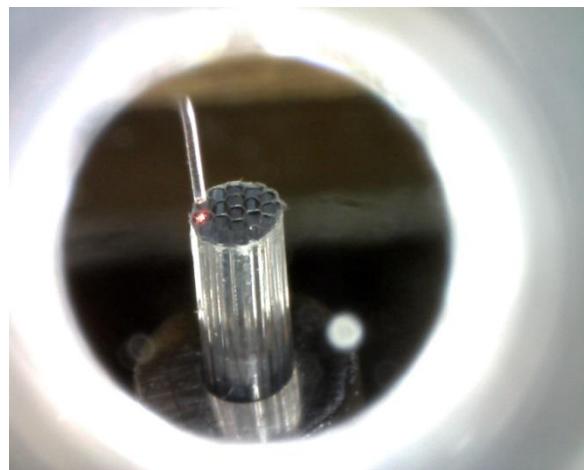


Figura 3.2 Imagen captada por la cámara CCD utilizada para el control de la inyección desde la fibra de vidrio monomodo hasta la FOP-MN.

Esta cámara se mantendrá fija durante todas las medidas a realizar durante el presente trabajo, ya que el sistema de inyección no se modificará y pese a que el extremo de FOP-MN será sustituido en numerosas ocasiones, el plano de enfoque de la cámara no variará. El sistema de acople entre la FOV monomodo y la FOP-MN utilizado corresponde al mostrado en la Figura 3.3:

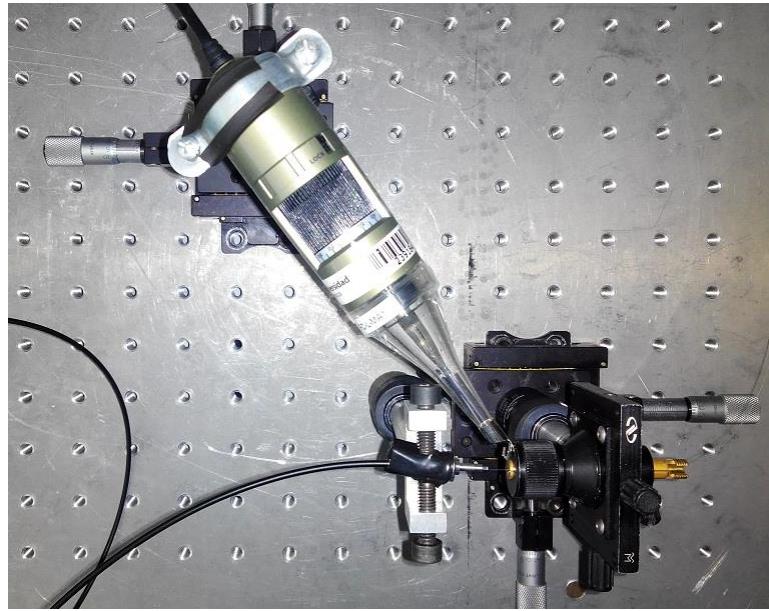


Figura 3.3 Vista cenital del sistema de inyección desde la fibra de vidrio monomodo (derecha) hasta la FOP-MN (izquierda), así como de la cámara CCD utilizada para el control de ésta.

3.2 Registro del campo cercano

La etapa de registro del campo cercano corresponde a la toma de imágenes por parte de una cámara CCD (*Digimicro*, 1.3 Mpixel) que enfoca directamente el extremo de salida de la FOP-MN. El esquema de esta etapa corresponde al mostrado en la Figura 3.4:

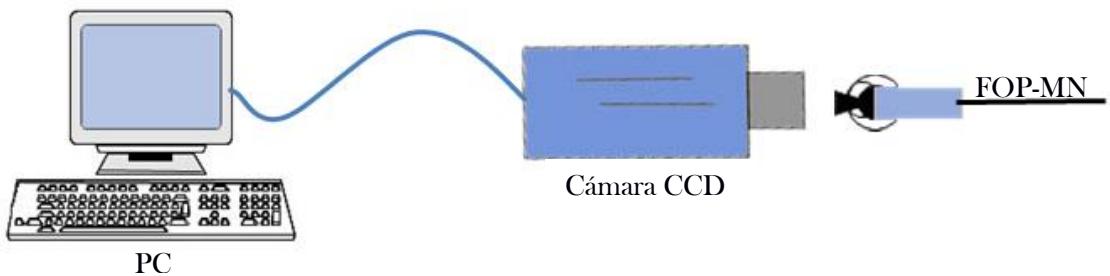


Figura 3.4 Esquema del sistema de registro del campo cercano utilizado

Para esta medida hay que tener especial precaución con la saturación de la cámara, ya que el haz incide directamente sobre el objetivo y es fácil que este fenómeno suceda, invalidando por lo tanto la medida.

Así, se realiza un control de potencia emitida desde el láser mediante el uso de dos filtros polarizadores lineales basados en una película polimérica, y regulados para

obtener una potencia que no sature la cámara CCD del bloque de registro del campo cercano. Estos filtros se sitúan a la salida del láser, de manera que la potencia de entrada a la FOV monomodo esté ya adecuada al sistema.

El extremo a analizar de la FOP-MN está situado lo más cercano a la cámara sobre un posicionador micrométrico con movimiento en los 3 ejes que permite tanto el alineamiento vertical como horizontal así como su enfoque sobre la CCD. Situando la fibra más cerca obtendríamos una imagen borrosa, resultándonos inservible para su procesado, mientras que si situamos la fibra en una posición más lejana seguiríamos teniendo una imagen nítida ya que el enfoque se puede ajustar de manera manual, pero sería de menor tamaño por lo que se perdería precisión. El montaje utilizado para el registro del campo cercano es el mostrado en la Figura 3.5:

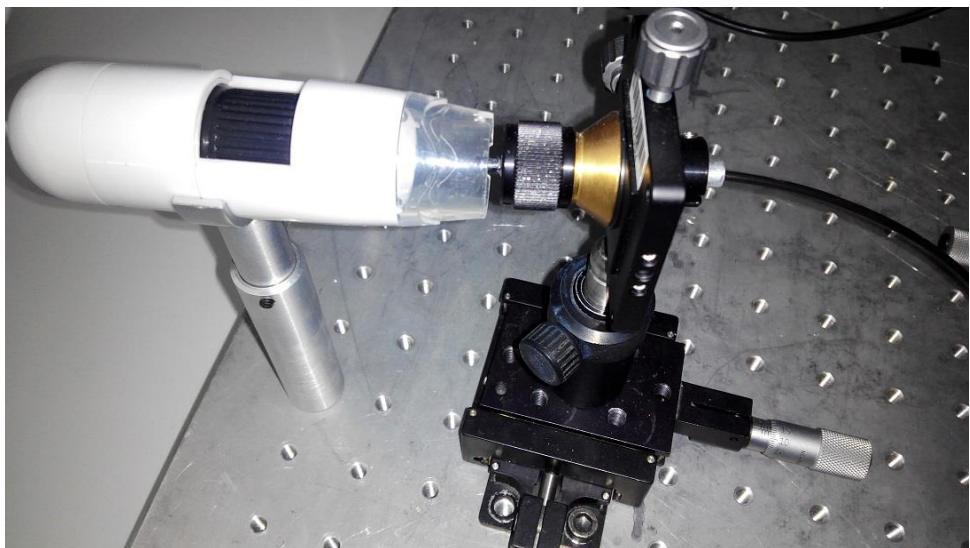


Figura 3.5 Vista lateral del sistema de registro de campo cercano utilizado

Las imágenes del campo cercano captadas por la cámara CCD son almacenadas y posteriormente procesadas por el software desarrollado, explicado en profundidad en el Apartado 4.

3.3 Registro del campo lejano

Para el registro del campo lejano se ha seguido una metodología diferente a la anterior, consistente en la proyección del haz procedente del extremo de la fibra a analizar sobre una superficie blanca uniforme, a una determinada distancia y bajo unas

condiciones de bajo ruido dentro de una caja sellada. Esta proyección es captada con una cámara monocromática de 12 bits (*Qicam Fast 139A*), situada en un ángulo de 45° respecto a la fibra, como muestra el esquema de la Figura 3.6:

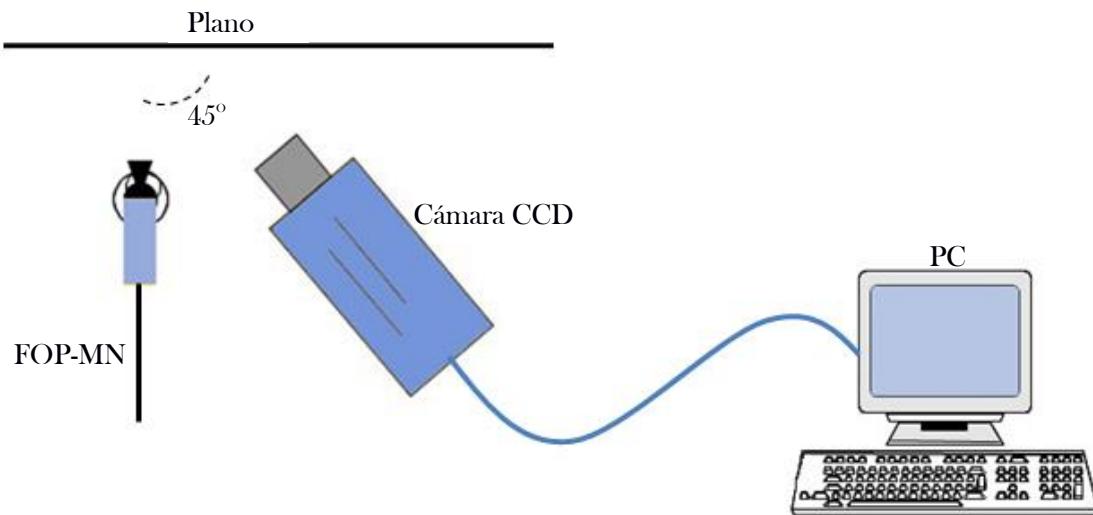


Figura 3.6 Esquema del sistema de registro de campo lejano utilizado

La cámara captura imágenes de la proyección sobre el plano con el tiempo de exposición especificado por el usuario, y las envía directamente al software específicamente diseñado para su procesado en otros proyectos y que ha sido utilizado en otros trabajos realizados por el grupo de FOP. En concreto, además de almacenar la imagen y corregir la inclinación de la cámara, extrae parámetros de interés correspondientes al campo lejano, como el perfil radial. El funcionamiento de este software es explicado más detenidamente en el Anexo VI.

Así, el montaje utilizado para el registro del campo lejano es el correspondiente al de la Figura 3.7:

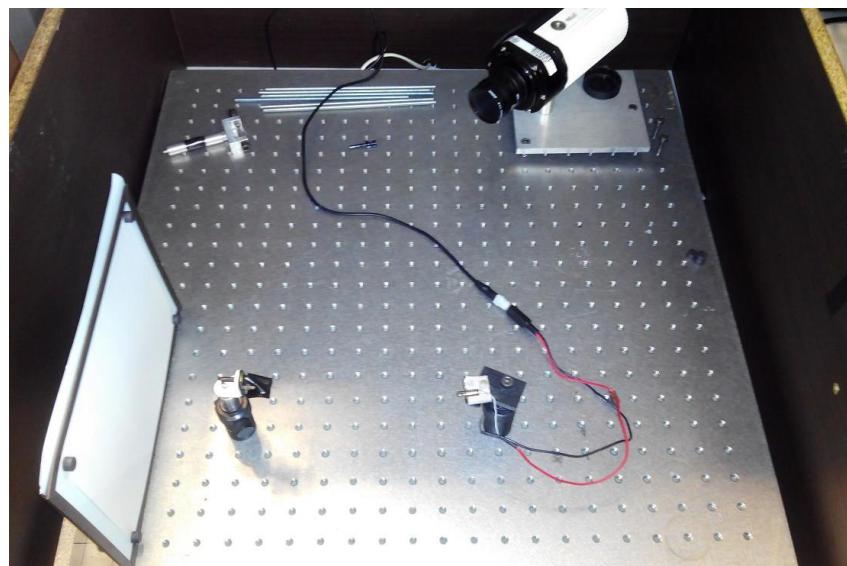


Figura 3.7. Vista cenital del sistema de registro de campo lejano utilizado

4 Desarrollo del software de análisis de campo cercano

En este apartado se explica detalladamente el proceso que se ha seguido para el desarrollo del software que analizará la distribución de intensidad de luz en los núcleos de la FOP-MN. A modo general, el esquema que describe el software es el que se muestra en la Figura 4.1:

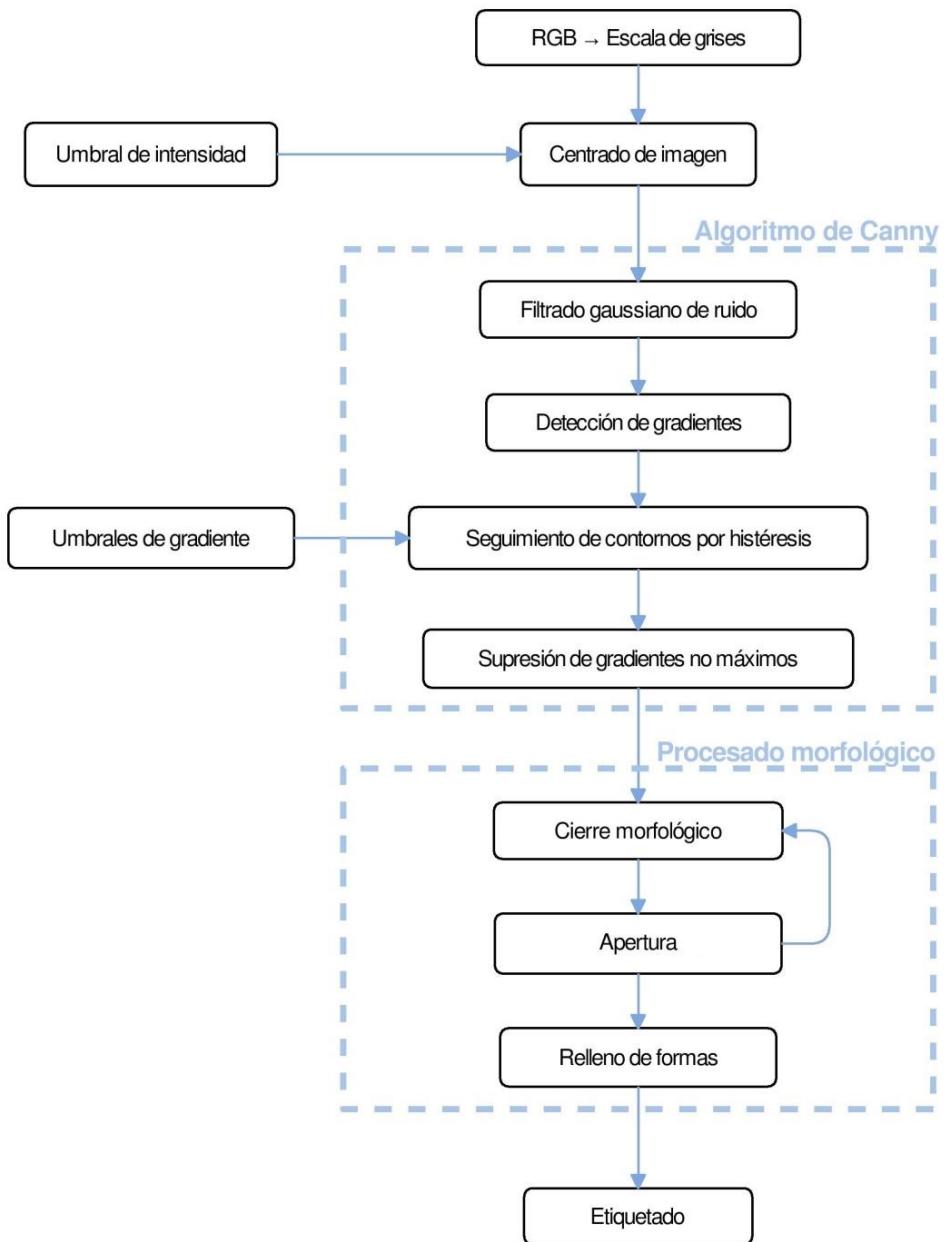


Figura 4.1 Diagrama completo de flujo del software propuesto

La mecánica principal del programa será tomar en primer lugar una imagen de la sección transversal de la FOP-MN a analizar, inyectando luz blanca por el otro extremo, para identificar en ella la posición de los núcleos. A este patrón de imagen lo denominaremos ‘máscara’ a partir de ahora. La inyección de luz en este caso se realiza de forma directa proyectando una fuente sobre una pantalla y orientando el extremo de la fibra hacia dicha pantalla para que la luz captada por todos los núcleos sea la misma. Posteriormente y sin modificar las condiciones del extremo de la fibra en el cual hemos tomado la imagen de la máscara, se realizarán las inyecciones que se consideren oportunas con el láser He-Ne.

El software implementado para el reconocimiento de la forma de los núcleos trabaja por tanto con la máscara, y se basa en la detección de gradientes mediante el algoritmo de Canny [12, 13, 14, 15]. Una vez detectados los píxeles correspondientes al gradiente se inicia un bucle de procesado morfológico de la imagen resultante, cuyo objetivo es el de transformar los píxeles disgregados devueltos en el algoritmo anterior en un patrón sólido y conformado por los núcleos necesarios. Finalmente se identifican las regiones comprendidas por cada uno de los núcleos establecidos, que se considerarán independientes pudiéndose aplicar de manera individual o conjunta según convenga.

Además, sobre la imagen captada por la cámara se realiza una etapa de preprocessado en la que se eliminan zonas de interés nulo para ahorrar el coste computacional equivalente en los pasos siguientes.

4.1 Pre-procesado de la imagen

En esta primera etapa se recibe la imagen directamente captada desde la cámara CCD de 1.3 Mega Pixel, cuyo espacio de color es RGB o escala de grises y cuya resolución es de 1280x1024 (no obstante este valor tan solo influye en la calidad y no en el funcionamiento del programa, ya que también son aceptadas resoluciones diferentes), y se entrega una imagen de menor tamaño en la que se ha suprimido la zona de ruido de alrededor de la fibra, como se observa en la Figura 4.2:

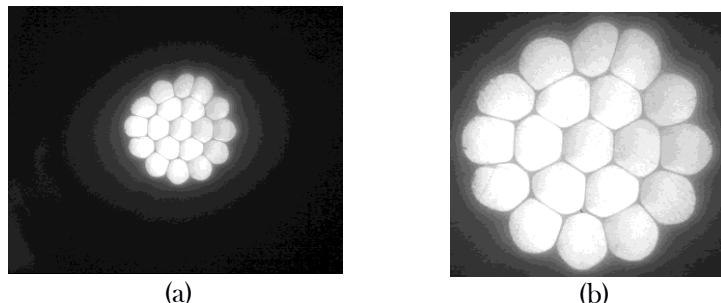


Figura 4.2 (a) Imagen en escala de grises captada por la cámara CCD utilizada para el registro del campo cercano; (b) Imagen automáticamente centrada en la zona de interés, que será la entrada del algoritmo.

El procesado en esta etapa no encierra complejidad ya que en primer lugar se realiza una transformación en el espacio de color de RGB a escala de grises, en el caso de que la imagen de entrada no estuviera anteriormente en este formato, y posteriormente se recortan los laterales de ésta según un umbral de intensidad fijado automáticamente por el programa. Este umbral se calcula en función de los valores de la propia imagen, y es interesante variar esta dependencia según el entorno experimental. Actualmente, dadas las condiciones de medida del presente trabajo y el nivel de ruido que ofrecen, se ha establecido al 30% de la intensidad máxima.

Tras este umbral la imagen se ajustaría completamente a la fibra, por lo que se deja un ligero margen de seguridad de manera que, pese al reajuste, no se pierda información.

4.2 Algoritmo de Canny

En la segunda etapa del procesado se aplica un algoritmo de detección de gradientes. La entrada de esta etapa será la imagen centrada obtenida en el preprocesado, mientras que la salida será una imagen binaria del mismo tamaño que la anterior, en la que determinados bits toman el valor '1' según se haya detectado un gradiente o no. Los valores de los píxeles de salida donde se haya detectado gradiente, si bien serán inconexos debido al ruido en la imagen de entrada, deberán guardar un aspecto relativamente limpio que se ha de buscar mediante sucesivos filtrados.

La razón principal por la que se ha elegido el algoritmo de Canny es la limpieza del resultado; una imagen demasiado ruidosa implicaría dificultad en los sucesivos pasos de reconstrucción, por lo que es necesario hacer uso de un algoritmo que nos permita depurar este error en la medida de lo posible.

Como se ha visto en el esquema de la Figura 4.1, las etapas del algoritmo de Canny implementado son un filtrado inicial gaussiano de ruido, la detección en sí de gradientes, un posterior seguimiento de los contornos por histéresis y la supresión final de los gradientes débiles, con el fin de eliminar ruido. Este algoritmo hace uso de algunas rutinas del implementado en Matlab®, aunque se han modificado cada uno de los pasos de mismo con el fin de ajustarlo al objetivo que se pretende, así como también se han eliminado y añadido diferentes elementos como se observa en los siguientes apartados. El hecho de realizar un algoritmo orientado a un tipo específico de medidas hace que éste pierda su carácter general, permitiendo su enfoque total a los parámetros de más interés.

4.2.1 Filtrado gaussiano de ruido

La primera etapa del algoritmo de Canny consiste en aplicar un filtro gaussiano para suavizar la imagen que se recibe. El procedimiento consiste en definir un filtro gaussiano convencional y de él obtener un filtro gaussiano derivativo, que será el que finalmente se aplique. Ambos filtros se considerarán unidimensionales, aplicándose horizontal y verticalmente.

El filtro gaussiano inicial será el representado en la Ecuación 4.1:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

donde σ es la desviación típica, en este caso $\sqrt{2}$.

Derivándolo se obtiene el filtro gaussiano derivativo correspondiente al mostrado en la Ecuación 4.2:

$$g'(x) = \frac{-1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma^3} \cdot x \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

Este filtro será el que finalmente se aplique a la imagen, tanto en el eje 'x' como en el eje 'y', como se aprecia en la Figura 4.3. A estas matrices las llamaremos 'dx' y 'dy' respectivamente.

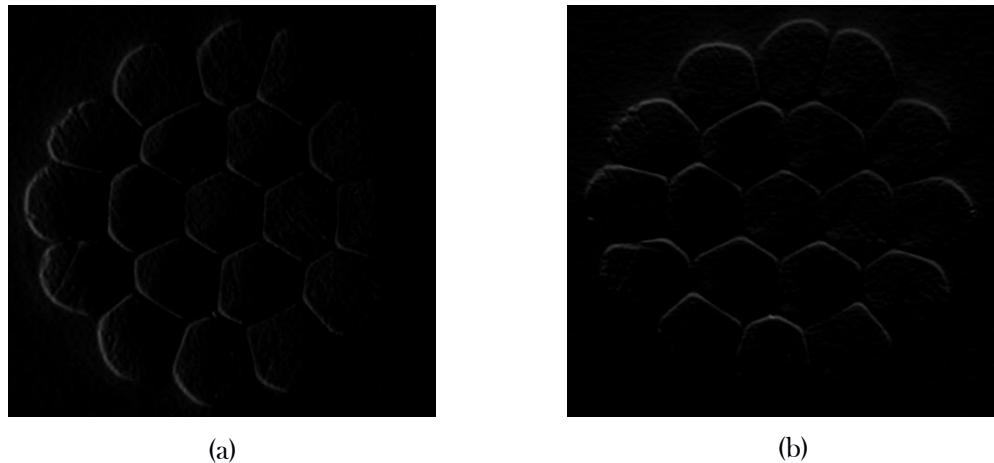


Figura 4.3 (a) Matriz 'dx', resultante de aplicar un filtrado gaussiano derivativo en el eje 'x'; (b) Matriz 'dy', resultante de aplicar un filtrado gaussiano derivativo en el eje 'y'.

4.2.2 Detección de gradientes

Una vez se han obtenido tanto la matriz ‘dx’ como la matriz ‘dy’, se deben detectar aquellos píxeles considerados gradientes definitivos. En este caso, para que un píxel sea considerado gradiente éste debe cumplir las dos condiciones siguientes, correspondientes a las fórmulas 4.3 y 4.4:

$$dx(i, j) > dx(i - 1, j) \wedge dx(i, j) > dx(i + 1, j) \quad (4.3)$$

$$dy(i, j) > dy(i, j - 1) \wedge dy(i, j) > dy(i, j + 1) \quad (4.4)$$

Los píxeles determinados como gradientes de esta manera serán considerados bordes, mientras que en el momento que un píxel no cumpla cualquiera de las condiciones anteriores, será considerado de fondo. Para la toma de esta decisión, se omiten los píxeles pertenecientes al borde de la imagen.

Este sería el proceso a seguir para un algoritmo de detección de contornos convencional mediante gradiente. Se ha seleccionado en concreto el algoritmo de Canny debido a su capacidad de adaptación para desenvolverse en tareas específicas mediante la introducción de nuevos parámetros o modificaciones internas en el propio algoritmo, característica necesaria para este caso y que se muestra en los siguientes apartados.

En el algoritmo de Canny se define una matriz de magnitudes de los gradientes, del mismo tamaño que la imagen original y cuyos valores corresponden a la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los gradientes de cada píxel en ambas dimensiones, tal y como se describe mediante la función 4.5:

$$m(i, j) = \sqrt{dx^2(i, j) + dy^2(i, j)} \quad (4.5)$$

La matriz resultante corresponde en este caso a la Figura 4.4:

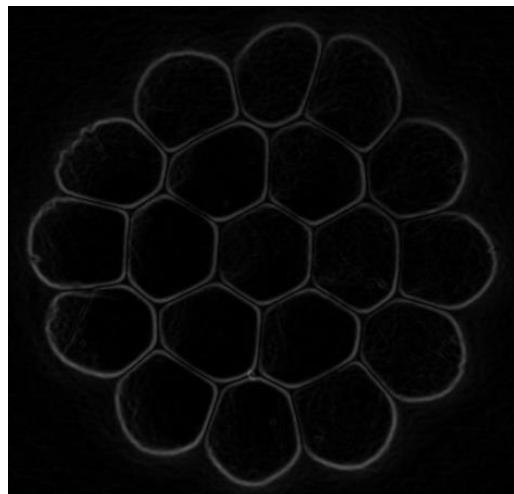


Figura 4.4 Matriz ‘m’ de magnitudes de los gradientes, resultante de aplicar la ecuación 4.5 sobre las matrices ‘dx’ y ‘dy’.

Esta matriz, calculada directamente a partir de las matrices de gradientes, muestra con claridad la división de los núcleos de la fibra y a partir de ella y sin demasiado procesado adicional se podría obtener un modelo inicial de la máscara. Sin embargo y pese a que las divisiones entre núcleos están claramente marcadas, los contornos exactos de estos no están lo suficientemente definidos debido a la variación de magnitud del gradiente a lo largo de ellos, por lo que en el supuesto caso de aplicar un filtro sencillo como puede ser el de umbral, sus áreas estarían expuestas a errores debido a que zonas del recubrimiento entre núcleos se contabilizarían como área efectiva.

Teniendo en cuenta que este software será utilizado para extraer de las medidas de campo cercano una estimación de la intensidad de luz que viaja por cada uno de los núcleos, es preferible omitir alguno de los valores útiles para cada área que tomar píxeles del recubrimiento como válidos, ya que su intensidad será cero a la hora de medir y la media calculada se verá muy afectada por este tipo de error. Es por ello que se torna necesario aplicar las etapas adicionales que nos aporta el algoritmo de Canny, realizando un seguimiento de cada contorno estableciendo umbrales tanto superiores como inferiores.

4.2.3 Seguimiento de contornos por histéresis

Para solventar el problema anterior se determinan dos umbrales de magnitud de gradiente, definiendo así una ventana de histéresis que decidirá los gradientes finales. Para este software, dado que las condiciones de medida van a ser semejantes y que su uso va a estar centrado en tomar imágenes en campo cercano de FOP-MN, se ha fijado el umbral inferior (T_L) como el superior multiplicado por una constante, optimizada para tal efecto. Así durante las medidas experimentales se ha de optimizar el umbral superior (T_H), que se entregará como parámetro de la función, siendo calculado el umbral inferior según la ecuación 4.6:

$$T_L = 0,36 \cdot T_H \quad (4.6)$$

La constante se ha establecido en 0,36 tras comprobarse que se trata del valor más adecuado para los valores de SNR correspondientes a las medidas realizadas, y que condiciona la anchura de la ventana de histéresis.

La segunda decisión de gradientes, utilizando esta histéresis, se basa en definir como bordes aquellos píxeles cuya magnitud de gradiente ($m(i, j)$) es mayor que el umbral superior; por el contrario, si la magnitud del gradiente de un píxel es menor que el umbral inferior se le considerará como píxel de fondo. Si esta magnitud está contenida dentro de la ventana establecida, el píxel será marcado como borde si es adyacente a otro borde; si este píxel está rodeado de píxeles de fondo será marcado así también de fondo, asegurando de esta manera la continuidad de los bordes detectados y eliminando ruido residual que pueda surgir durante esta etapa. La conexión de los píxeles de los bordes

será un factor importante en la reconstrucción morfológica de la imagen, apartado siguiente del software.

4.2.4 Supresión de gradientes no máximos

Finalmente se aplica una supresión de gradientes no máximos para eliminar píxeles considerados como borde en la anterior etapa mediante la histéresis, cuya pertenencia a este grupo no es clara. En consecuencia los bordes se vuelven más finos al estar compuestos por menos píxeles.

En este proceso, para cada píxel marcado anteriormente como borde se verifica que al menos la magnitud del gradiente de uno de sus valores adyacentes sea menor que él. Si la totalidad de los píxeles adyacentes posee una magnitud de gradiente mayor que la del píxel anteriormente marcado como borde, este píxel será considerado de fondo a partir de ahora.

De esta manera se consigue subsanar los errores residuales tras la aplicación de los umbrales previamente, y se obtienen unos valores de píxeles de borde fiables en los que el número de falsos positivos es muy pequeño. Como se verá a continuación, al aplicar varias etapas de procesado morfológico es importante que los píxeles sobre los que las apliquemos sean los adecuados.

Así la detección de bordes como tal a partir del algoritmo de Canny queda concluida, obteniéndose una imagen como se observa en la Figura 4.5:

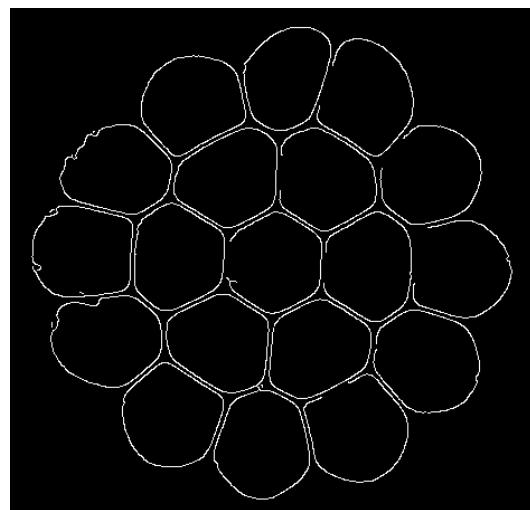


Figura 4.5 Imagen resultante de aplicar el algoritmo completo de Canny sobre la imagen de entrada al programa, y que posteriormente será la entrada del algoritmo de procesado morfológico.

Sobre esta imagen se aplicarán una serie de procesados morfológicos con el fin de reconstruirla de la manera más fiel posible, buscando obtener finalmente un patrón con 19 núcleos bien diferenciados.

4.3 Procesado morfológico

El procesado morfológico es una técnica de procesamiento no lineal de la señal, caracterizada por realzar la geometría y la forma de los objetos [16, 17, 18]. Esta metodología no es exacta en cuanto al resultado de la delimitación de formas, pero trabaja basándose en puntos de referencia (en este caso los calculados mediante el algoritmo de Canny) los cuales deben ser correctos para llegar a un buen resultado de reconstrucción final.

El objetivo de este tipo de procesado es identificar determinados elementos geométricos dentro de una imagen, a partir de diferentes operaciones en las cuales se hace uso de elementos estructurales fijados con anterioridad, los cuales definen tanto el tamaño como la forma de los píxeles que conforman la vecindad de cada píxel, que interaccionará con ellos para definir su nuevo valor tras una operación morfológica.

En este caso el objetivo será el de identificar los 19 núcleos de la imagen de la FOP-MN captada en campo cercano, cuya geometría pese a ser cercana a la del círculo en todos los casos, difiere en gran medida de la de cada uno de los otros núcleos de la fibra.

La entrada de los métodos morfológicos utilizados es en su mayoría una imagen binaria, por lo que para el primer operador será la correspondiente a la Figura 4.6. Para los operadores posteriores, la entrada será la salida del anterior creando de esta manera una cadena que irá modificando la imagen hasta llegar a obtener cada uno de los núcleos de manera definida. Estos núcleos al no tener una forma geométrica fija serán considerados como áreas conexas, siendo por tanto el objetivo de esta etapa el tener tantas regiones conexas como núcleos tenga la fibra que estemos utilizando.

El procesado morfológico se basa fundamentalmente en las operaciones de dilatación y de erosión.

La dilatación añade píxeles a los bordes de las regiones conexas de la imagen binaria de entrada, a las cuales a partir de ahora se les denominará objetos por

simplicidad. La metodología consiste en evaluar todos los píxeles de la imagen según el modelo de vecindad definido por el elemento estructural, y asignarles a estos el mayor valor de entre sus píxeles vecinos, como muestra la Figura 4.6:

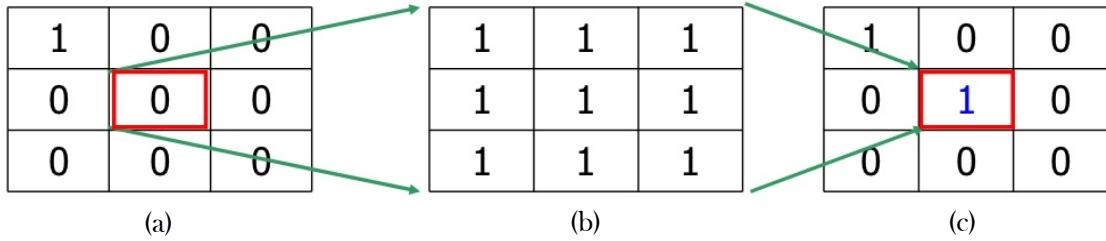


Figura 4.6 Proceso de dilatación de una región determinada de una imagen: (a) Región de entrada al algoritmo de dilatación; (b) Elemento estructural utilizado en el proceso de dilatación; (c) Región de salida.

Así, la dilatación amplía los bordes de los objetos de la imagen y elimina protuberancias producidas por posibles píxeles aislados.

Por su parte, el efecto de la erosión es el contrario. En esta ocasión los píxeles de la imagen son evaluados y toman el menor valor de entre los píxeles de la vecindad definida por el elemento estructural. El efecto producido por la erosión es el mostrado en el ejemplo de la Figura 4.7:

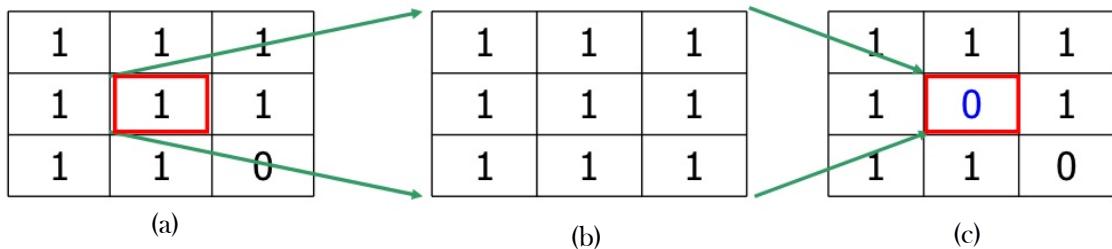


Figura 4.7 Proceso de erosión de una región determinada de una imagen: (a) Región de entrada al algoritmo de erosión; (b) Elemento estructural utilizado en el proceso de erosión; (c) Región de salida.

La erosión, al contrario que la dilatación, reduce los bordes de los objetos y los separa en el espacio de la imagen.

El procesado utilizado está compuesto de una etapa inicial de cierre morfológico, en la que se unen puntos específicos con el objetivo de reconstruir la imagen, y una etapa de apertura encargada de eliminar ruido. Estas dos etapas forman un bucle que se repite hasta obtener la imagen deseada, y tras el cual, finalmente se realiza un relleno de formas para eliminar el ruido en la parte externa de la fibra. Este bucle termina cuando las regiones detectadas son las deseadas, en nuestro caso 19.

4.3.1 Cierre morfológico

El cierre morfológico se define como la combinación en cascada de una dilatación y una erosión haciendo uso del mismo elemento estructural para cada una de ellas [16, 18]. El objetivo de la aplicación del cierre morfológico es el suavizado de los contornos de los núcleos de la fibra, así como la eliminación del ruido que pueda haber en su interior y la conexión de sus puntos con el objetivo de obtener regiones completamente cerradas.

Es este último el mayor problema que surge a la hora de generar la máscara, ya que en ocasiones las discontinuidades de los núcleos son de un tamaño lo suficientemente considerable como para no poder ser tratadas de la manera adecuada. Para la reconstrucción de estos núcleos haciendo uso del cierre morfológico se proponen diversas líneas de tamaño variable como elementos estructurales, cuya orientación es la de los ángulos que sean especificados. Estas operaciones de cierre morfológico se realizan en un bucle de tamaño equivalente al número de elementos estructurales que se hayan definido, de manera que cada iteración aplique uno de ellos.

En el caso de definir líneas como elementos estructurales cubriendo todos los ángulos de una semicircunferencia, la aplicación del conjunto de los respectivos cierres morfológicos equivaldría a utilizar como elemento estructural un círculo de radio igual a la mitad de la longitud de estas líneas. En el software propuesto se realiza una primera aproximación haciendo uso de 4 ángulos formando 4 elementos estructurales que unen las discontinuidades horizontales, verticales y correspondientes a las bisectrices de las anteriores, para posteriormente y tras la apertura explicada en el siguiente apartado, hacer una segunda aproximación utilizando un barrido de ángulos más amplio y dotando a la imagen de un aspecto más cercano a la realidad. El tamaño de las líneas como elementos estructurales aumenta progresivamente de manera que en cada iteración se unan puntos más lejanos, cambiando su forma de la manera anteriormente explicada tras cada iteración del bucle.

Pese a que el uso de líneas como elemento estructural permite trabajar con una mayor fidelidad respecto a la imagen original, en la última iteración del bucle de procesado morfológico se trabaja con un círculo como elemento estructural. Este círculo es de menor tamaño respecto a las líneas usadas anteriormente, y su función es la de corregir las irregularidades que hayan podido formarse por el hecho de utilizar líneas y redondear los núcleos, sin afectar a sus áreas.

4.3.2 Apertura de área

Tras cada aplicación del cierre morfológico es necesario recurrir a una apertura del área de la imagen. Este proceso consiste en filtrar la imagen binaria de entrada de manera que a la salida se hayan eliminado las regiones conexas formadas por menos píxeles de los especificados [16, 18].

El concepto de este procesado morfológico es obtener regiones conexas cada vez de mayor tamaño tras los sucesivos cierres morfológicos, y en consecuencia aplicar tras cada uno de ellos una apertura de área más restrictiva eliminando cada vez regiones conexas más grandes. De esta manera se llega finalmente a obtener una única región conexa que define todos los núcleos.

El bucle completo formado por el cierre morfológico y la apertura de área se repite hasta obtener 19 núcleos lo suficientemente claros. En la Figura 4.8 se observa una de sus iteraciones:

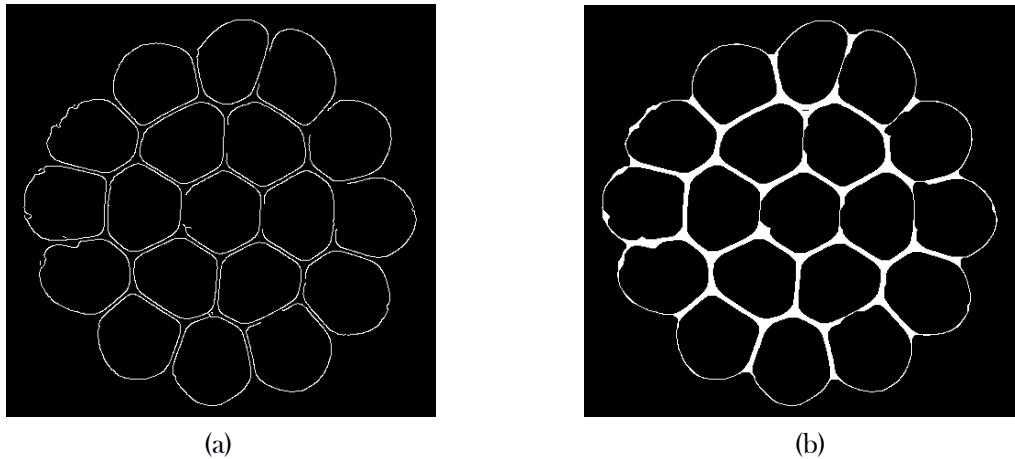


Figura 4.8 Primera iteración del bucle: (a) Imagen de salida del algoritmo de Canny, que será la entrada del algoritmo de procesado morfológico; (b) Imagen resultante tras la primera iteración.

4.3.3 Relleno de formas

Esta etapa es el último paso del procesado de imagen como tal, y actúa sobre la imagen cuya forma es ya definitiva [17].

En esta sección se transforma la imagen desde el formato de salida del procesado morfológico al formato final con el que trabajaremos. Los cambios que sufre la imagen binaria carecen de complejidad y se centran en definir los núcleos como las únicas regiones conexas de la imagen, objetivo para el cual se llega a la imagen inversa formando un fondo sólido, como muestra la Figura 4.9, y posteriormente se niega en su totalidad obteniendo la máscara con la que trabajaremos.

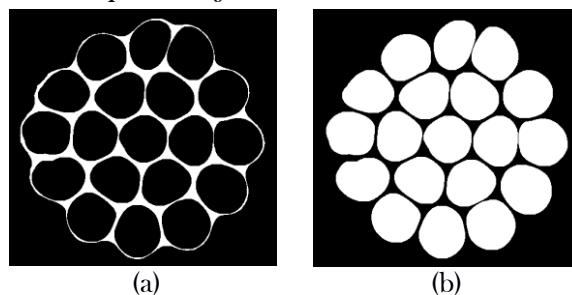


Figura 4.9 (a) Imagen binaria de salida tras completar el número necesario de bucles de procesado morfológico; (b) Imagen binaria final que servirá como máscara, con regiones conexas positivas y aisladas que definirán los núcleos.

4.4 Extracción de características

Una vez que ha sido obtenida la imagen binaria con las regiones conexas correspondientes, sus respectivas coordenadas son guardadas de manera independiente. Con estas coordenadas se pueden generar tantas máscaras como núcleos tenga la fibra, en este caso 19, y su aplicación es individual.

A partir de la imagen tomada para realizar la máscara y haciendo uso de las coordenadas obtenidas se extraen características de la fibra que serán útiles para los cálculos posteriores como son el área de cada núcleo y su centroide [17, 19]. Además cada región se identifica mediante un etiquetado, asignando un número por núcleo de izquierda a derecha con el fin de diferenciarlos, tal y como se observa en la Figura 4.10:

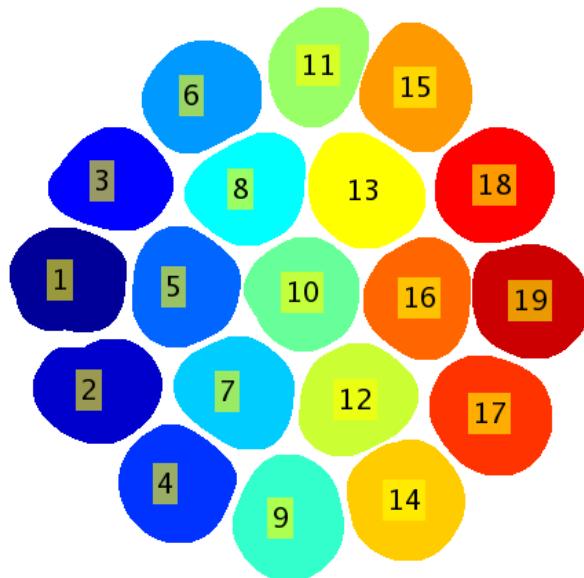


Figura 4.10 Imagen correspondiente a la máscara final, donde los núcleos han sido identificados y numerados individualmente

5 Medidas experimentales

5.1 Protocolo experimental

En este apartado se explica el protocolo experimental llevado a cabo de manera previa a la realización de las medidas y durante éstas. Es de suma importancia controlar factores como la preparación de las fibras o las condiciones de medida, ya que de ellas dependerá el ruido que esté presente en los resultados. Las medidas son llevadas a cabo en las condiciones descritas por la normativa JIS C0010 [20] (temperatura comprendida entre 15 y 35°C, presión del aire entre 86 y 106 kPa y humedad relativa entre 25 y 85%).

En primer lugar se debe tener en cuenta la precisión que es necesaria en el presente trabajo, ya que el objetivo es inyectar un haz de luz desde una FOV monomodo hasta cada uno de los núcleos de una FOP-MN de manera individual. Es por este motivo que las condiciones en las que se encuentren ambos extremos de las fibras juegan un papel importante en el resultado de las medidas obtenidas. Por ello, antes de comenzar las medidas, se han preparado cuidadosamente los extremos tanto de la fibra de vidrio utilizada para la inyección como de la FOP-MN bajo test siguiendo los procedimientos y utilizando las herramientas descritas en el Anexo VII.

Al margen del proceso de preparación de la fibra, otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de realizar las medidas son las condiciones del entorno a nivel de ruido. En este caso la luz del laboratorio donde se lleva a cabo el proceso experimental se traduce en forma de ruido ambiental que afecta fundamentalmente a la toma de imágenes en campo cercano. Debido a la gran atenuación de las FOP se desprecia la intensidad de luz que llega al extremo de emisión de la FOP-MN producto del ruido ambiental que se introduzca en la inyección, siempre y cuando las condiciones de medida sean las adecuadas. Sin embargo esta contaminación lumínica es especialmente dañina a la hora de tomar las imágenes, ya que debido al hardware utilizado siempre se va a contar con un pedestal de ruido que disminuye el rango dinámico de la medida. Es por este motivo que pese a no poder eliminarlo de manera completa, es conveniente tratar de minimizarlo en la medida de lo posible, por lo que las medidas se han registrado trabajando sin luz eléctrica y bloqueando la luz procedente del exterior.

Una vez preparadas las fibras, se obtiene primero la máscara iluminando todos los núcleos al mismo tiempo con luz blanca. Después, se instala el extremo de la fibra monomodo de visible y se enfrenta al láser de He-Ne. El otro extremo se alinea con ayuda del sistema cámara-espejo para inyectar sobre los núcleos específicos. Se elimina la luz ambiental y en dichas condiciones, se comprueba que no hay saturación en la CCD

de registro controlando la potencia mediante los filtros. Por último, se comienza la tanda de medidas que debe realizarse en una misma sesión para mantener las mismas condiciones.

5.2 Diafonía en FOP-MN

El primer fenómeno estudiado mediante el software desarrollado es el de la diafonía entre núcleos. Para este estudio se ha utilizado la FOP-MN *SMCK 1000P* (Anexo V) de 19 núcleos, empleando fibras de 3 longitudes diferentes, limitadas por los recursos disponibles en el laboratorio. Estas longitudes son 25 y 50 metros procedentes de un mismo carrete, y 84 metros de un segundo carrete.

La inyección en la FOP-MN se realiza con la FOV *RGB-400* (Anexo IV), de apertura numérica 0,12 y controlada mediante la cámara CCD. La potencia inyectada se maximiza sin llegar al punto de saturación de la cámara que controla el campo cercano.

Es conveniente resaltar que para determinar la intensidad de luz viajando por cada núcleo tan solo se han considerado aquellos en los que el área iluminada era de un tamaño considerable ya que se ha observado que cuando la luz se introduce en uno de los núcleos se distribuye de manera inmediata prácticamente por toda su superficie de forma uniforme, debido a las inhomogeneidades del material y a las irregularidades en la superficie.. De esta forma se consigue eliminar la luz espuria que aparece sobre los núcleos contiguos al analizado [21, 22], que podría ocasionar falsos resultados de diafonía. En la Figura 5.1 se observa cómo este efecto provocaría falsos positivos en núcleos adyacentes al de interés, debido al ensanchamiento del haz en el camino desde la salida de la FOP-MN hasta la lente de la cámara CCD en campo cercano.

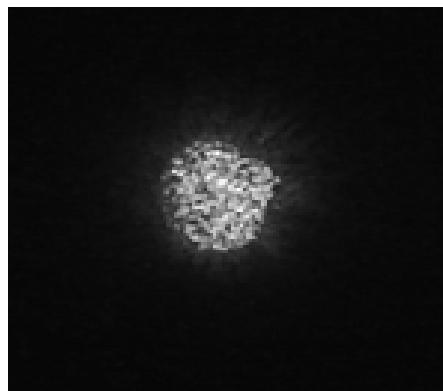


Figura 5.1 Fragmento de imagen captada por la cámara CCD en campo cercano inyectando por un núcleo del primer anillo en un tramo de FOP-MN de 1 metro, donde se aprecia el efecto contaminante del speckle y la apertura de haz en núcleos adyacentes al iluminado.

Con el objetivo de definir el protocolo experimental y mejorar los programas se hicieron experimentos preliminares con fibras de longitudes entre 1 y 1,5 metros en los que no se detectó transferencia de potencia entre núcleos próximos. Es por ello, que se decidió trabajar con fibras de longitudes relativamente largas ya que al propagarse la luz por la fibra la difusión favorece la transferencia de potencia a ángulos más altos, con mayor probabilidad de pasar a los núcleos adyacentes. De esta forma, se analizaron fibras de 25, 50 y 84 metros.

Los resultados en el tramo de fibra de 25 metros arrojan una diafonía nula tanto inyectando en el núcleo central como en cualquiera de los núcleos de los dos anillos de la FOP-MN. Este efecto se puede ver en los gráficos de la Figura 5.2 donde se representa la potencia transmitida normalizada respecto a la del núcleo que transmite mayor potencia inyectando en el núcleo central (10) y en núcleos 5 y 1 de los dos anillos circundantes. No obstante se han realizado al menos tres medidas de cada uno de los núcleos promediando los resultados.

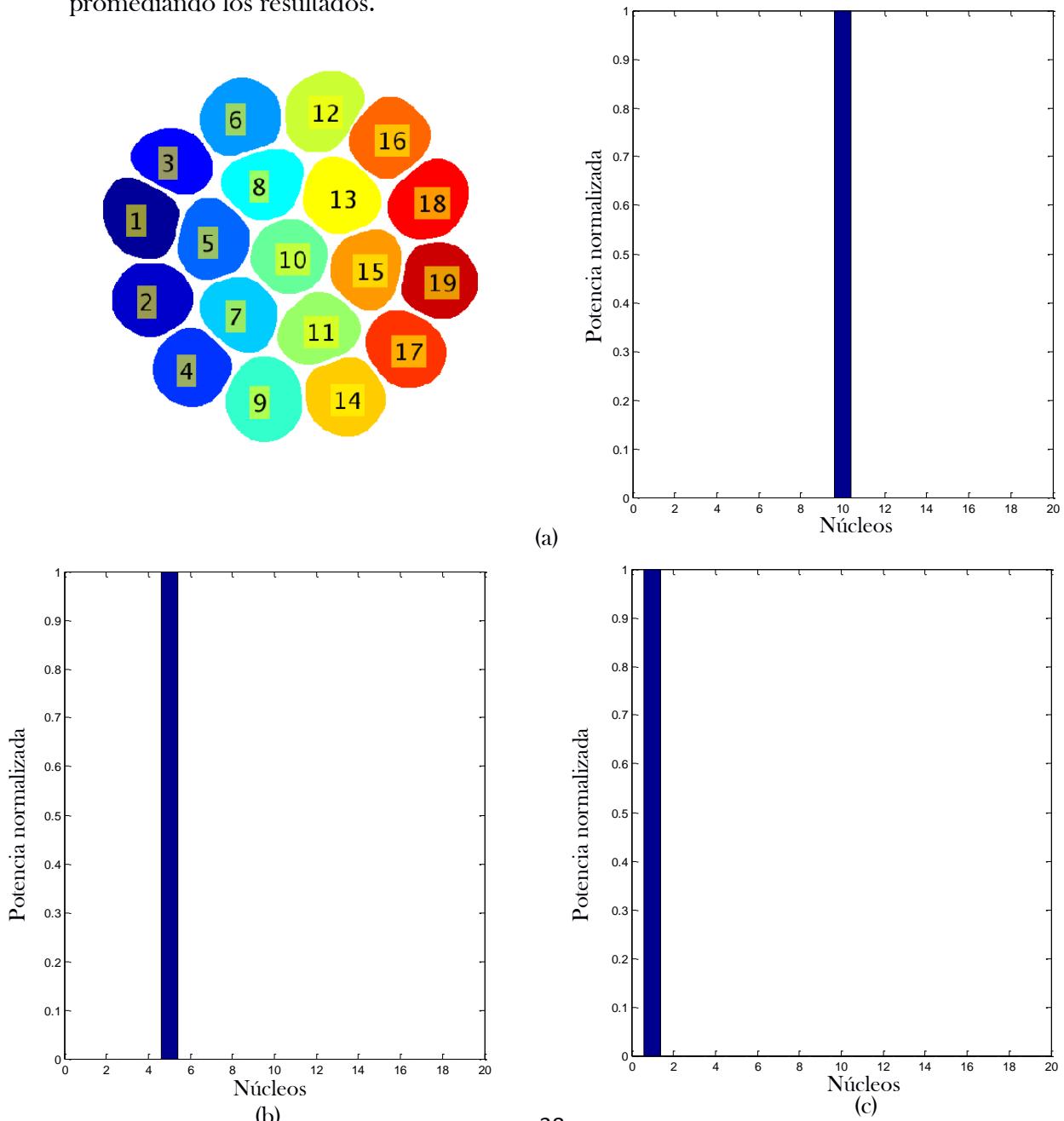


Figura 5.2 Medidas realizadas sobre un tramo de FOP-MN de 25 metros: (a) Potencia por núcleos inyectando por el núcleo central; (b) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del primer anillo; (c) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del segundo anillo.

Para las medidas en los tramos de 50 y 84 metros, se obtienen resultados similares a los de 25 metros como se muestra en la Figura 5.3:

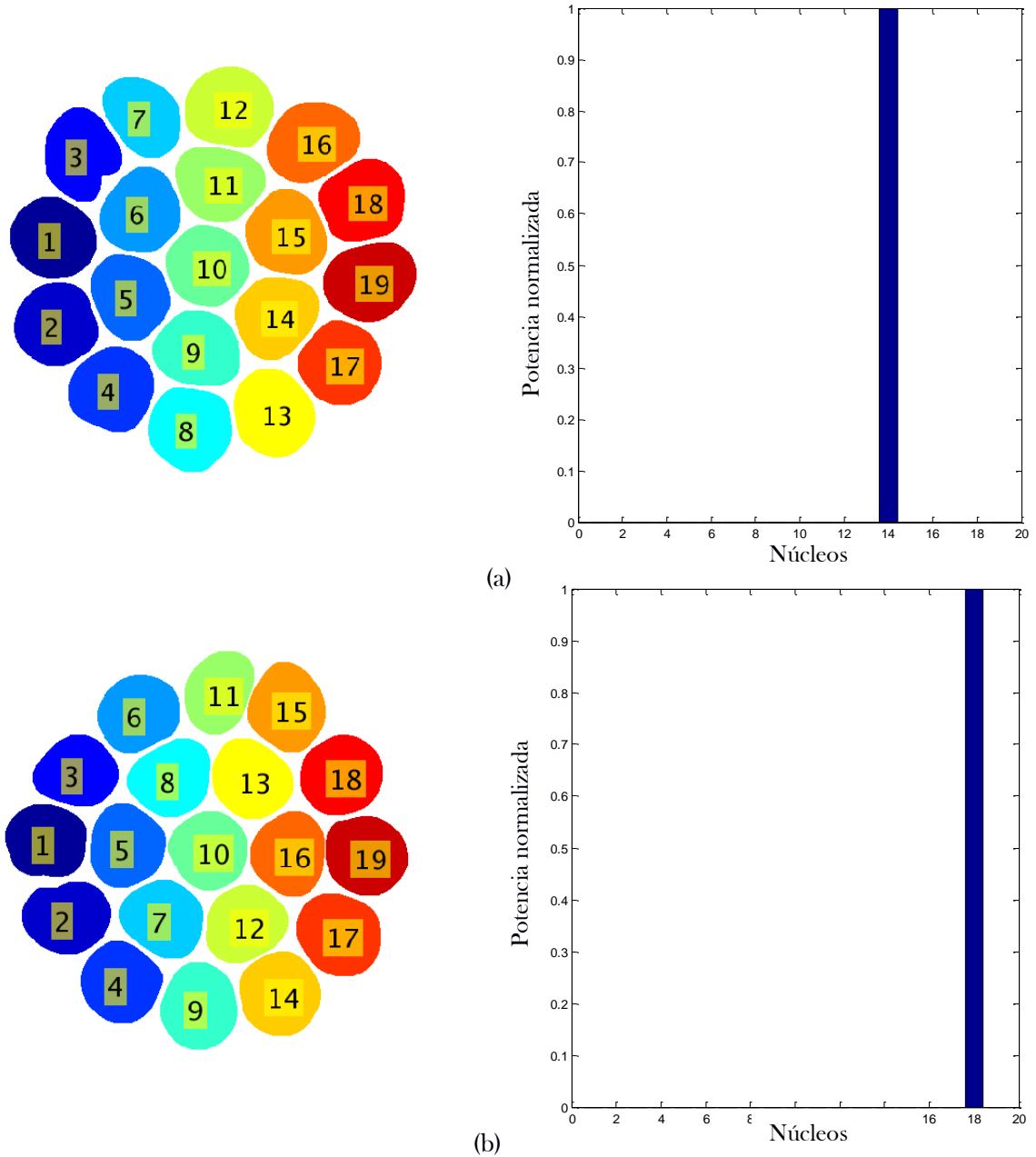


Figura 5.3 (a) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del primer anillo en un tramo de 50 metros; (b) Potencia por núcleos inyectando por un núcleo del segundo anillo en un tramo de 84 metros.

Así, todos nuestros resultados muestran que la potencia transferida a los núcleos adyacentes es nula o al menos inferior a la sensibilidad de la cámara con la que se trabaja. En un trabajo previo [24] se realizaron estimaciones teóricas utilizando un modelo basado en trazado de rayos que se compararon con resultados experimentales para fibras

FOP-MC de 37 y 127 núcleos. Sus resultados para fibras de 1 metro muestran que existe diafonía medible en estos dos tipos de FOP-MN con las condiciones de inyección utilizadas en sus experimentos. En concreto, en la fibra de 37 núcleos e inyectando con una apertura de 0.65 obtuvieron un FEXT de 16 dB que se traduce en un 2.5 % de transferencia a los núcleos adyacentes. Para la fibra de 127 que, además del número de núcleos muestra otras características diferentes, la diafonía medida fue mucho mayor (71%). La explicación de la ausencia de diafonía y las diferencias con nuestros resultados con los de este trabajo se justificarán más adelante en el apartado de discusión.

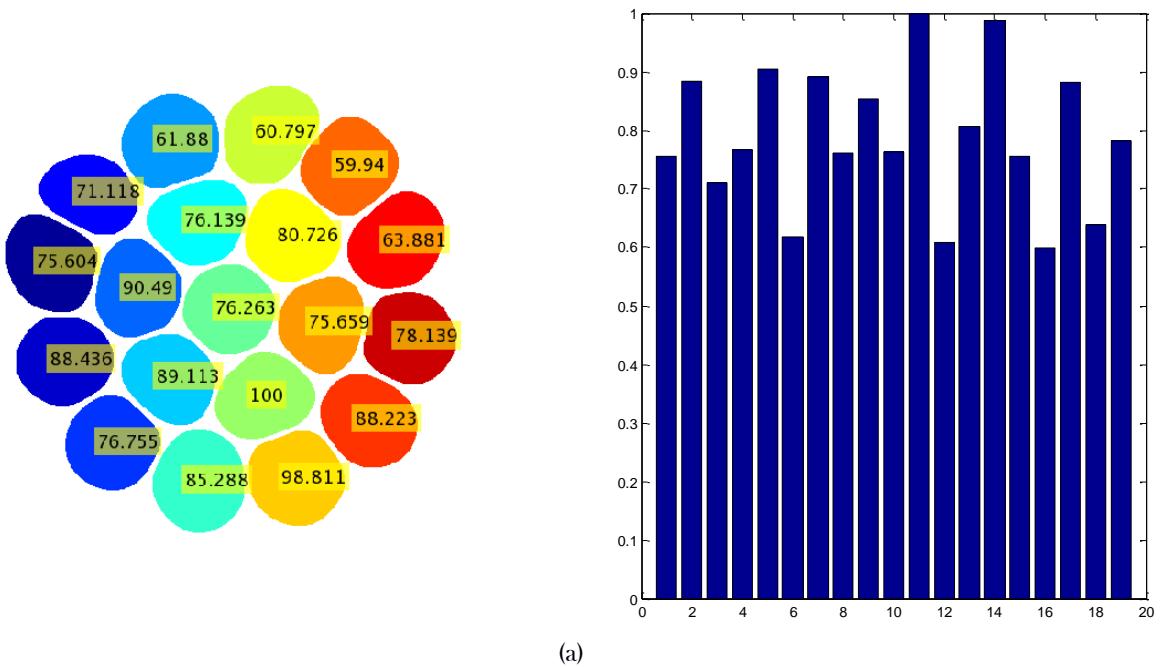
Durante la realización de los experimentos de medida de la diafonía, se ha observado que la intensidad de luz captada por la cámara en campo cercano varía de forma significante según el núcleo en el que se inyecte, por lo que se decide realizar un nuevo estudio en profundidad acerca de este comportamiento aprovechando el sistema experimental y el software desarrollados.

5.3 Atenuación relativa en la FOP-MN

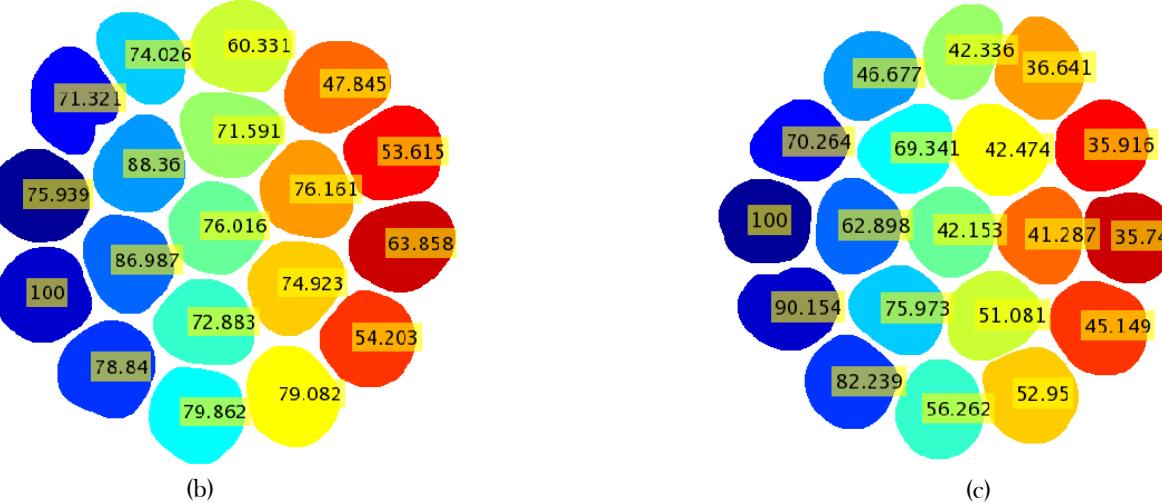
En este apartado se realiza un estudio de la variación en la atenuación entre los núcleos de una misma fibra bajo las mismas condiciones de inyección. Los tramos de fibra utilizados son los de 25, 50 y 84 metros utilizados en el apartado anterior.

5.3.1 Atenuación relativa entre núcleos

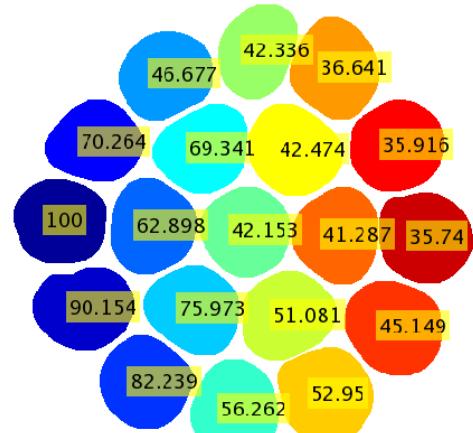
La metodología está basada en realizar las 19 medidas correspondientes a cada núcleo de cada tramo de fibra, sin modificar la potencia de inyección y con cuidado de que ésta no sature en ningún momento la cámara CCD con la que tomamos las imágenes. Este proceso se realiza tres veces y se obtiene la media de las intensidades medidas. De esta forma se puede comparar la potencia relativa que se inyecta y transmite por cada uno de los núcleos. A partir de estas medidas se obtiene la potencia transmitida por cada núcleo respecto al núcleo que transmite la máxima potencia. En la Figura 5.4 se muestran las tres longitudes de fibras con el porcentaje de potencia viajando en cada núcleo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4 Porcentaje de potencia por núcleos respecto del núcleo de mayor potencia inyectando individualmente por cada uno de ellos en tramos de: (a) 25 metros; (b) 50 metros; (c) 84 metros.

Las figuras muestran que hay bastante diferencia entre las potencias que llegan al final de la fibra transmitidas por distintos núcleos. Hay que notar que el núcleo central no es el que transmite mayor potencia. De hecho, en la fibra de 84 metros transmite menos de la mitad que el máximo, el cual se obtiene para un núcleo del anillo exterior. Los diagramas de barras muestran que las diferencias entre potencias se incrementan al aumentar la longitud de la fibra. Por ello, para determinar hasta qué punto estas diferencias se producen debido a variaciones en la propagación (debidas, por ejemplo, a la forma o tamaño de los núcleos) o bien tienen su origen en la inyección se procede a aplicar el método de *cut-back* definido por la normativa JIS C6863 [23], dejando un metro de fibra en el extremo de la cámara sin modificar su enfoque o la posición de la fibra respecto a esta, ya que en ese caso la máscara obtenida carecería de utilidad para este segundo paso y la relación entre medidas se perdería. De nuevo el extremo del corte es preparado conforme el protocolo experimental, para posteriormente volver a tomar las

medidas anteriores por núcleos de manera individual. Los resultados obtenidos para los tramos de 1 metro se muestran en la Figura 5.5 para cada una de las longitudes:

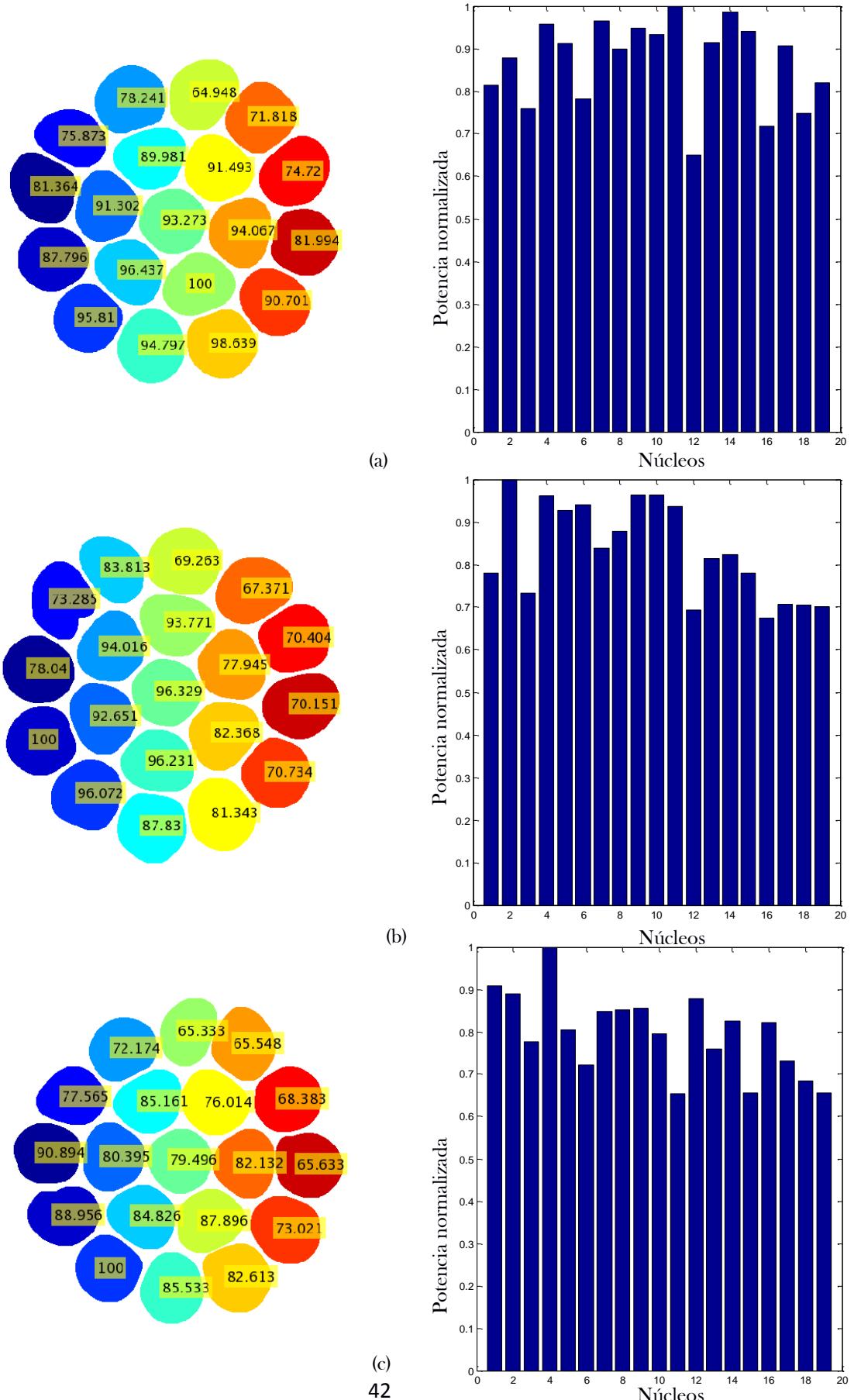


Figura 5.5 Potencia por núcleos respecto del núcleo de mayor en tramos de 1 metro realizando el método de *cut-back* a los anteriores tramos de: (a) 25 metros; (b) 50 metros; (c) 84 metros.

Entre ambas medidas la potencia inyectada es reajustada ya que de otra manera, al eliminar la atenuación equivalente al tramo de fibra sustraído, contaría con una gran saturación en la cámara y no se podrían obtener los valores buscados. El objetivo final de estas medidas es hallar la atenuación entre núcleos, es decir, la diferencia de potencia en dB de un núcleo respecto a otro. Por esta razón el cambio de potencia inyectada entre medidas de diferentes tramos no afecta a los valores de atenuación, mientras que sí que lo haría un cambio entre medidas durante núcleos del mismo tramo de fibra.

En la figura 5.5 observamos que en todos los casos, la potencia máxima para el tramo de 1 metro se mantiene en el mismo núcleo que para correspondiente fibra larga. Las diferencias entre núcleos, sin embargo, se reducen bastante. Por ejemplo, para la el tramo de 1 metro procedente de la fibra de 84 metros, el núcleo central tiene un valor de 79.5% respecto del central cuando para dicha longitud el valor era de 42.1%.

Con los datos para todos los núcleos de la potencia relativa para el tramo completo y para el rabillo de 1 metro se obtendrá la atenuación relativa de cada núcleo dentro de la fibra, que se representa en dB en la Figura 5.6:

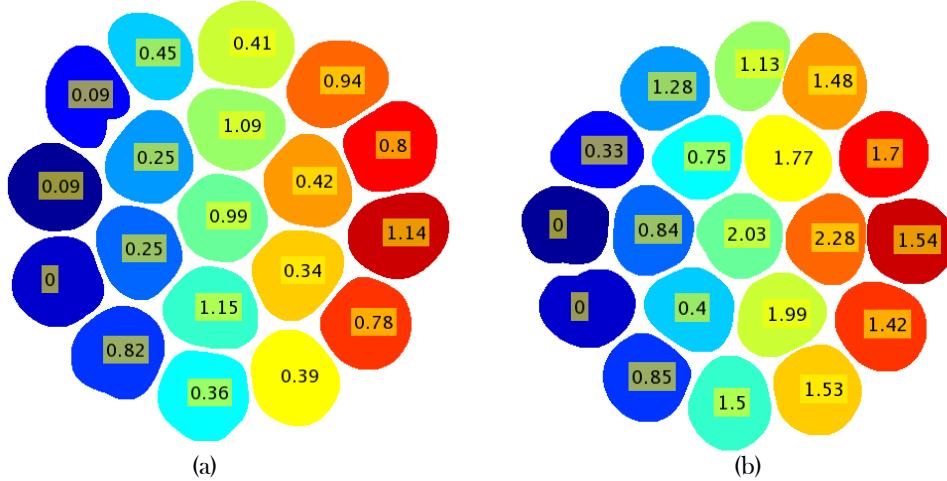


Figura 5.6 Pérdidas en dB de los núcleos de la FOP-MN respecto al núcleo de mayor potencia para tramos de: (a) 50 metros; (b) 84 metros.

Las figura muestra que hay bastante diferencia de atenuación entre núcleos y que estas diferencias se incrementan con la longitud del tramo de fibra (en 50 metros, hasta 1.15 dB y en 84 metros hasta 2.23 dB). Salta a la vista que la distribución de atenuaciones no es uniforme ni tampoco sigue un patrón de distribución lógico en función de los anillos de la fibra sino que por el contrario se encuentra completamente desplazado hacia un lado de la FOP-MN. Este fenómeno se manifiesta en mayor medida en los tramos de

fibra de 50 y 84 metros, donde la diferencia de atenuación es mayor, mientras que los resultados en el tramo de 25 metros son más irregulares.

Aunque parece lógico relacionar este efecto con diferencias residuales en la inyección o en el corte de la fibra, se ha comprobado que los resultados son repetitivos y que para cada uno de los tramos estudiados el patrón se produce siempre en el mismo lugar de la fibra para los tres tramos estudiados, aunque con menor magnitud para menores longitudes. Además se ha observado este mismo comportamiento en otros estudios del mismo carácter trabajando con FOP-MN de 19 núcleos [24] que si bien no estudian este fenómeno muestran imágenes donde se aprecia que también está presente, hecho que confirma que el proceso de medida utilizado no es responsable de su aparición.

Reconstruyendo los cortes de las fibras a partir de las 19 atenuaciones de los núcleos se obtiene una visualización de la potencia que llega por cada uno de ellos, como muestra la Figura 5.7:

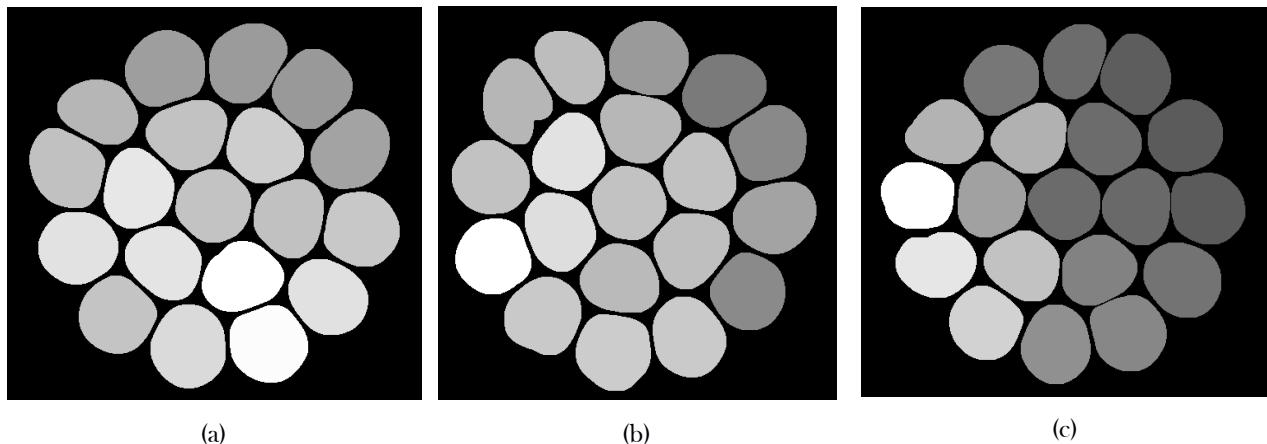


Figura 5.7 Reconstrucción en escala de grises de la iluminación de los núcleos según los valores de potencia obtenidos para tramos de: (a) 25 metros; (b) 50 metros; (c) 84 metros.

En esta representación es más evidente que los núcleos de una zona (en la fibra de 84 metros, la zona izquierda) son los más iluminados mientras que los de la zona opuesta son los menos iluminados independientemente del anillo en el que se encuentran. Este cambio de comportamiento de núcleo a núcleo, traducido en una mayor atenuación, puede estar relacionado con una variación de las propiedades de guiado entre núcleos, lo que se estudiará en futuros apartados obteniendo la AN.

5.4 Apertura numérica de los núcleos

En este apartado se realiza un estudio de la apertura numérica de los núcleos de la fibra utilizada en las medidas anteriores, utilizando el tramo de 25 metros.

En el apartado anterior, se ha visto que las pérdidas en los diferentes núcleos de la FOP-MN no son iguales. Estas diferencias podrían explicarse por el diferente comportamiento del núcleo individual debido a su capacidad para captar y guiar luz por lo que se decide realizar una medida de la AN de cada núcleo como parámetro global que caracteriza las propiedades de propagación. Para ello se ha utilizado el sistema de campo lejano descrito en el apartado 3.3. El valor de AN indicado para este tipo de FOP-MN en la hoja de características es de 0,6, tratando la fibra como un conjunto y no especificando para cada núcleo.

Para esta medida se sitúa la fibra perpendicular a un plano uniforme, a una distancia de 10 centímetros, y la imagen de la luz reflejada en éste se capta mediante una cámara CCD enfocando en un ángulo de 45° . Se realizan 5 medidas para cada núcleo obteniendo el perfil radial en función del ángulo que se extrae de las imágenes del patrón de campo lejano mediante el software descrito en el Anexo VI. La AN de cada núcleo se determina a partir del ángulo (α) para el cual el perfil radial cae al 1% de su valor máximo como muestra la Ecuación 5.1:

$$AN = n_0 \cdot \operatorname{sen}(\alpha) \quad (5.1)$$

Como paso previo a la realización de este tipo de medidas, es necesario cerciorarse de que la AN se ha estabilizado para la longitud del tramo utilizado. En una FOP, la luz sufre un proceso de difusión al propagarse a lo largo de ésta que se estabiliza a partir de una cierta distancia dependiente de los parámetros de la fibra. En una FOP-MN el diámetro de cada núcleo es aproximadamente cinco veces menor que en una FOP-SN, por lo que esta estabilización se producirá en una distancia notablemente menor que en el caso de FOP convencional. Se ha observado en diferentes estudios [23] que para una longitud de 25 metros la difusión es estable en una FOP-SN inyectando con una FOV monomodo de visible igual que en el caso presentado, por lo que se puede asegurar que en este caso más favorable también lo será y las medidas tomadas serán consideradas como válidas.

La Figura 5.8 muestra el perfil radial tanto del núcleo central como de núcleos del primer y segundo anillo respectivamente, pertenecientes a la zona menos iluminada de la fibra, ya que una comparación entre núcleos de diferentes zonas no contendría información útil:

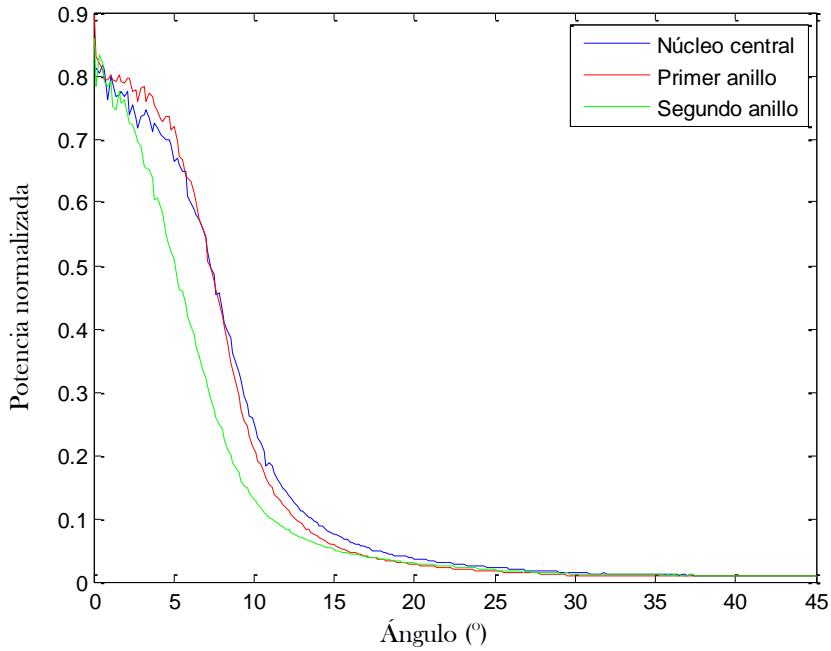


Figura 5.8 Perfil radial de tres núcleos pertenecientes al centro de la fibra, al primer anillo y al segundo anillo

Tras realizar la media para las medidas de cada núcleo y aplicando los cálculos pertinentes anteriormente explicados, se obtienen las AN mostradas en la Figura 5.9:

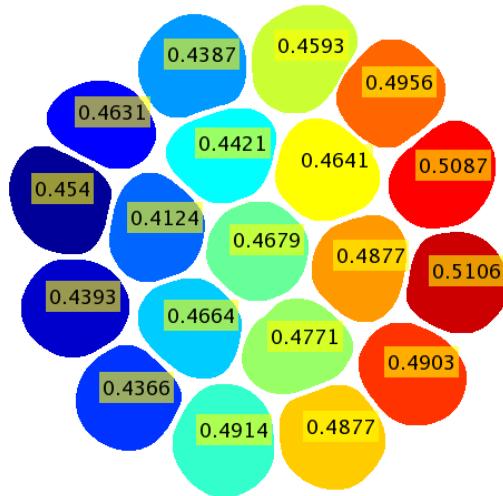


Figura 5.9 Aperturas numéricas de cada núcleo, medidas individualmente en cada uno de ellos

Los valores obtenidos se aproximan al especificado en la hoja de características, pero el hecho de más interés es que de nuevo se aprecia el desplazamiento de las mayores AN hacia una zona lateral de los núcleos de forma similar al patrón seguido por la atenuación por la variación en propiedades de guiado, que podría explicar las

diferencias de atenuación en los distintos núcleos más que otros fenómenos como la difusión o la absorción. Para determinar con certeza si la hipótesis planteada es correcta, debería realizarse la medida de la atenuación relativa y la de la AN para el mismo tramo de fibra en las mismas condiciones de forma que se pueda verificar que existe una fuerte correlación entre ambos parámetros. Sin embargo, en la discusión haremos un estudio basado en un modelo simple usando los valores extremos tanto de la AN como de la atenuación relativa para ver si es válida esta explicación.

Resulta interesante realizar una comparación entre la AN medida anteriormente en cada núcleo y la AN general de la FOP-MN. Así pues, se ha obtenido el perfil radial en el mismo tramo de FOP-MC de 25 metros inyectando en todos los núcleos a la vez mediante un láser de semiconductor de AN media de 0,3, mostrado en la Figura 5.10:

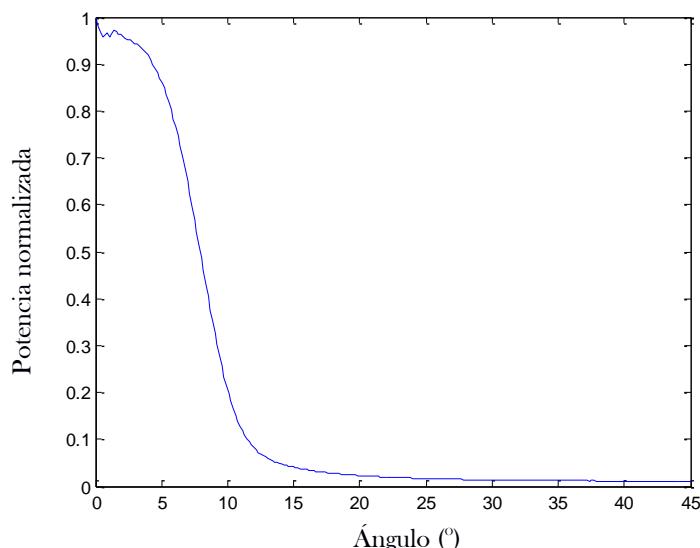


Figura 5.10 Perfil radial de la FOP-MN, inyectando por todos los núcleos y midiéndolos en conjunto.

De la manera anterior y a partir de éste se obtiene la AN correspondiente a la FOP-MC:

$$AN_{FOP-MC} = 0,4955$$

Este resultado muestra cómo la AN del conjunto es cercana al promedio de las de los distintos núcleos.

5.5 Discusión de los resultados

El proceso de obtención de resultados en este proyecto ha seguido una línea de continuidad lógica, ya que los mismos resultados obtenidos son los que han creado la necesidad de obtener los siguientes para entender los efectos observados.

En primer lugar, no se encontró diafonía en fibras de longitudes en torno a 1 metro. La nula transferencia de potencia en fibras cortas se puede justificar por nuestro sistema de inyección. Sin embargo, no podemos atribuir la ausencia de diafonía al pequeño tamaño de la fibra monomodo de visible (< 5 micras de diámetro) ya que la luz no se mantiene confinada cerca del punto de inyección sino que, distribuye inmediatamente por toda la superficie del núcleo como muestra la imagen de la Figura 5.4, correspondiente a un tramo de FOP-MN de 1 metro. Por otra parte, la transferencia de potencia entre núcleos aumenta, como es de esperar, al aumentar la anchura de la distribución de potencia a la entrada de la fibra, ya que los rayos más susceptibles de acoplarse son aquellos más cercanos al ángulo crítico. En nuestro caso, la fibra monomodo tiene una apertura de 0.12 que supone una inyección con ángulos de 10° como máximo, muy por debajo de los 36° que es el ángulo de aceptancia de nuestra FOP ($AN=0.6$) y en torno al cual es más probable que ocurra diafonía. Esta es la principal justificación de las diferencias encontradas con los resultados mostrados en otros estudios [22] en lo que se consiguió aumentar la apertura de inyección hasta 0.65 utilizando objetivos de microscopio.

La ausencia de diafonía en tramos cortos nos llevó a centrarnos en longitudes mayores. Sin embargo, tampoco para fibras de 25, 50 y 84 metros se detectó diafonía. Al propagarse la luz, la potencia inyectada en unos ángulos se transfiriendo a ángulos adyacentes debido a la difusión de forma que la distribución de potencia se ensancha y aparece potencia en ángulos próximos al crítico lo que debería de favorecer su transferencia a núcleos adyacentes. Esto se ha verificado obteniendo esta distribución, que viene dada por el perfil radial del campo lejano, para cada uno de los núcleos de una fibra de 25 metros (apartado 5.4). Los datos demuestran que, en 25 metros, la apertura de los núcleos es cercana a 0.5 confirmando el ensanchamiento predicho. Sin embargo, la cantidad de potencia en los ángulos altos es muy pequeña (1%, por la propia definición de AN) debido también a que experimentan una mayor atenuación. Por ello, la potencia transferida sería muy baja y no detectable con nuestro sistema.

En [24] se determinó que los parámetros que influyen en la cantidad de diafonía son la apertura numérica, la distancia de separación entre núcleos y el radio de los mismos. A menor apertura, se obtiene mayor diafonía según han demostrado experimentalmente comparando los resultados de la fibra de 37 núcleos con apertura de 0.5 con los de la de 127 cuya apertura es de 0.185 y tiene una diafonía bastante mayor. También se ha observado que, tal y como cabía esperar, la cantidad de diafonía es inversamente proporcional a la separación entre los anillos de los núcleos, que disminuye

al aumentar el número de estos y que, en nuestra fibra, con 19 núcleos, toma el valor mayor. Otro parámetro que influye sobre la diafonía es el radio del núcleo debido a que, cuanto menor es este valor, mayor es el número de reflexiones que los rayos sufren a lo largo de su recorrido por la fibra y, en consecuencia, la diafonía aumenta. El tamaño de los núcleos en nuestra fibra es de 250 micras frente a 70 y 12.5 micras para las fibras de 27 y 127 núcleos respectivamente. Todos estos factores son consistentes en predecir una menor diafonía en nuestro caso.

Se asocia por tanto la ausencia de diafonía medible por un lado a las características de la FOP-MC testeada, concretamente al tamaño de los núcleos y a la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el material del revestimiento que confina la luz en el interior del núcleo de forma efectiva, así como el espesor de este material entre núcleos que evita que la luz que escapa de un núcleo llegue al adyacente. Por otra parte, hay cambios en el sistema experimental que podrían favorecer la detección de diafonía como el uso de mayores aperturas en la inyección y una cámara con un mayor rango dinámico que permita inyectar mayores potencias en un núcleo sin saturar a la vez que medir valores muy pequeños en los adyacentes.

Durante el proceso de medida de diafonía se han observado diferencias en las pérdidas de cada uno de los núcleos por lo que se han realizado medidas para cuantificar este efecto e intentar explicar su origen. Por un lado, se ha comprobado que estas diferencias no están relacionadas con la posición relativa al núcleo, es decir, que no es homogénea dentro de cada anillo. El patrón que siguen las diferencias es de favorecer los núcleos en una zona lateral respecto de los demás por lo que se ha asociado con el proceso de fabricación de la fibra, bien en el momento de su producción o bien en el de almacenado y embobinado, ya que al ser la misma zona la más afectada por la atenuación, se puede pensar que el tratamiento que sufre globalmente la FOP-MN afecta a los núcleos de diferente manera según dónde estén situados.

La diferencia entre las atenuaciones de los núcleos es bastante significativa y debería incluirse en el valor especificado de atenuación total de la hoja de características de la FOP-MN ya que, aunque para un enlace de comunicaciones de corta distancia no sea relevante, si lo es, sin embargo para determinadas aplicaciones como las de monitorización nombradas en el apartado 2.4.

Para intentar buscar una explicación a estas diferencias de atenuación, se ha medido también la variación de la AN a lo largo de los núcleos de la misma FOP-MN obteniendo un patrón de diferencias similar al de las pérdidas.

Sin embargo, aunque los núcleos con menor AN son los que presentan mayor atenuación relativa, no es posible que este hecho se deba a la menor captación de luz en la inyección. Si utilizamos un modelo simple en el que la FOV emite intensidad ($I(\theta)$) con una distribución muy directiva como muestra la Ecuación 5.2:

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos(\theta)^m \quad (5.2)$$

con $m=1000$. La fibra acepta luz en un ángulo sólido limitado por su ángulo de aceptación calculado a partir de su AN, la proporción de potencia inyectada sería la mostrada en la Ecuación 5.3:

$$\frac{P_{iny}}{P_{total}} = 1 - \cos(\alpha)^{m+1} \quad (5.3)$$

En este caso, debido a la directividad de la FOV, toda la luz se inyecta para cualquier AN en el rango de variación de 0,4 hasta 0,5, por lo que las diferencias de luz inyectadas no explican la diferencia en potencias transmitidas por cada núcleo.

Por otra parte, la AN ha sido medida a partir de los patrones de campo lejano a la salida de la fibra lo que sí que nos permite relacionarla con la luz que sale de cada núcleo en función de dicha AN. Si suponemos que hay una distribución uniforme de potencia en todos los ángulos hasta el dado por la aceptancia e integramos en el ángulo sólido, obtenemos la expresión de la Ecuación 5.4:

$$P_S = AN^2 \quad (5.4)$$

Usando esta fórmula, el cociente al cuadrado entre las aperturas máxima y mínima medidas es $(0.41/0.51)^2 = 0.6463$ mientras que el de los valores máximo y mínimo de potencia transmitida entre núcleos para 25 metros es de $64,95/100 = 0.6495$, lo que es consistente con una cierta correlación entre ambos parámetros.

6 Conclusiones

6.1 Análisis cualitativo

El resultado general proyecto se considera muy satisfactorio ya que se ha desarrollado con éxito el software deseado para posteriormente estudiar un comportamiento de un determinado tipo de FOP-MN, el cual hubiera sido imposible analizar sin un programa de estas características. Los objetivos se han cumplido y las áreas de conocimiento abarcadas han sido amplias ya que se ha programado un procesado de imagen a bajo nivel y se han estudiado a partir de él comportamientos de la fibra, relacionándolos con los resultados de la teoría de comunicaciones ópticas. Por un lado, se ha aportado una nueva herramienta al grupo de FOP de la universidad, que se incorporará a su laboratorio de caracterización de fibras de plástico y por otro, se han obtenido medidas experimentales en un tipo de fibra, la FOP-MN, que no había sido estudiada hasta este momento.

El proyecto realizado ha sido un proyecto vivo y en constante evolución, marcándose a sí mismo los siguientes objetivos a alcanzar a medida que se cumplían los anteriores. Un ejemplo de ello son las pérdidas variables en los diferentes núcleos observadas a la hora de determinar la diafonía. Este hecho es consecuencia de empezar a trabajar con un tipo de fibra diferente como son las FOP-MN, y es un indicador del potencial de este tipo de análisis mediante procesado de imagen cuya flexibilidad ha hecho que sea posible adaptarlo al estudio de distintos parámetros.

A nivel de resultados, no se ha detectado diafonía alguna con las condiciones de medida utilizadas y se ha llegado a la conclusión de que la variación de las pérdidas en los núcleos puede estar correlacionada con la diferente apertura numérica de estos, cuyo origen puede ser fruto del proceso de fabricación de la fibra. Para afirmar este hecho en primer lugar se ha detectado la problemática mediante el software propuesto, se han diseñado experimentos para investigar efecto y finalmente, se ha buscado una asociación lógica de éste con las características de la fibra óptica, lo que supone un proceso experimental completo llevado a cabo utilizando la herramienta diseñada.

6.2 Líneas futuras

El sistema de inyección a núcleos individuales y el registro de la imagen de campo cercano que se han desarrollado en este proyecto y se han incorporado al laboratorio de caracterización de FOP de la EINA, son sistemas independientes que pueden utilizarse junto a otros subsistemas del laboratorio. De hecho, como parte de las medidas de este proyecto se han presentado las de AN obtenidas combinando el sistema de inyección con el sistema de medida del patrón de campo lejano desarrollado y utilizado en otros proyectos anteriores a éste. Por ejemplo, una medida interesante sería el estudio del ancho de banda inyectando en núcleos individuales y usando un sistema de medida de función de transferencia que está operativo actualmente en el laboratorio.

Por otra parte, existen mejoras en el sistema experimental como son el uso de objetivos de microscopio o fibras de mayor apertura que permitan inyectar un rango mayor de ángulos y explorar la posibilidad de diafonía en dichas condiciones. También resultaría interesante el estudio de cómo afecta la inyección desalineada de luz desde la FOV sobre los núcleos individuales. Así, cambiando el ángulo de inyección se estaría en disposición de obtener nuevos resultados que caracterizarían el comportamiento de la FOP-MC, ya que es posible que con ángulos altos de inyección se pudiera obtener diafonía medible.

El software desarrollado es tan solo un sistema base de un concepto diferente de medida, basado en el procesado de la imagen tomada en campo cercano de la sección transversal de una FOP-MN. A partir de esta metodología y utilizando tanto el programa presentado como otros similares en los que se incluyan nuevas funcionalidades, se pueden desarrollar modelos de control y de detección de eventos en la distribución de la intensidad de la luz en los núcleos de una fibra e incluso adaptarlo para medidas en otros tipos de fibra como son las de índice gradual de un solo núcleo. Además modificando la parte de instrumentación, en este caso la cámara CCD, se puede llegar a una imagen de mayor calidad de la que el software propuesto obtendría un mejor resultado sin necesidad de verse modificado.

Siguiendo con el análisis del patrón en campo cercano y lejano de los núcleos de manera individual, resultaría interesante el estudio de cómo afecta la inyección desalineada de luz desde la SMF. Así, cambiando el ángulo de inyección se estaría en disposición de obtener nuevos resultados que caracterizarían el comportamiento de la FOP-MC.

Un uso de este sistema en aplicaciones tales como las de monitorización presentadas en apartados anteriores se traduciría en una mejora sustancial de la precisión

de los resultados [11, 25, 26], así como en una sencilla detección de errores a nivel individual en los núcleos. Además el hecho de conocer el comportamiento de cada uno de los núcleos en una FOP-MN de una manera tan sencilla facilita la planificación y el diseño de comunicaciones mediante multiplexado espacial (SDM) [27], donde es de suma importancia el tratamiento de los distintos canales de comunicación por separado.

Referencias

- [1] A. G. Bell, «Selenium and the Photophone», *Nature*, 1880.
- [2] K. C. Kao y G. A. Hockham, «Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies», *Proceedings IEE*, Julio 1966.
- [3] [En línea] <http://www.corning.com/index.aspx>. Fecha último acceso: Septiembre 2015.
- [4] Y. Koike, E. Nihei, N. Tanio y Y. Ohtsuka, «Graded-index plastic optical fiber composed of methyl methacrylate and vinyl phenylacetate copolymers», *Applied Optics*, Junio 1990.
- [5] Y. Koike, «High-bandwidth graded-index polymer optical fiber», *Polymer*, 1991.
- [6] A. Flor, A. López, D. Richards, M.A. Losada, J. Mateo y J. Zubia, «POF 2015. Performance of electronic equalization techniques applied to POF links», 2015.
- [7] A. W. Snyder y J. D. Love, *Optical waveguide theory*, Londres: Chapman y Hall, 1983.
- [8] O. Ziemann, P. E. Zamzow, J. Krauser y W. Daum, «Optical Fibers», *POF Handbook*, Berlín, Springer, 2008.
- [9] «JIS C 6862:1991, Test methods for structural parameters of all plastic multimode optical fibers», 1991.
- [10] M.L. Casalicchio, «Innovative Plastic Optical Fiber Sensors», Turín, 2012.
- [11] L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto y R. Nogueira, «Optical Sensors Based on Plastic Fibers», *Sensors*, Septiembre 2012.
- [12] J. Canny, «A Computational Approach To Edge Detection», Noviembre 1986.
- [13] A. S. Irfanullah y D. A. Huynh, «Canny Edge Detection Report».
- [14] J. Valverde, «Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny», Trujillo.
- [15] H. S. Neoh y A. Hazanchuk, «Adaptive Edge Detection for Real-Time Video Processing using FPGAs», *Altera*.
- [16] [En línea] http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP_VisionArtificial/ApuntesVA/cap6VAProcMorf.pdf. Fecha último acceso: Septiembre 2015.
- [17] [En línea] <http://es.mathworks.com/help/images/morphological-filtering.html>. Fecha último acceso: Septiembre 2015.

- [18] [En línea] <http://www.slideshare.net/omarspp/imagen-morfologicas?related=1>. Fecha último acceso: Septiembre 2015.
- [19] Ruíz E. María E., Morales S. Miguel y Hernández M. Yahir, «Una estrategia de segmentación de imágenes digitales de huellas dactilares latentes», *RIEE&C*, Julio 2011.
- [20] «JIS C 0010:1993, Test methods for structural parameters of all plastic multimode optical fibers», 1993.
- [21] J. W. Goodman, «Some fundamental properties of speckle», California, 1976.
- [22] T. R. Moore, «A simple design for an electronic speckle pattern interferometer», Septiembre 2004.
- [23] «JIS C 6863:1990, Test methods for structural parameters of all plastic multimode optical fibers», 1990.
- [24] A. Berganza, «Estudio y Caracterización de las Fibras Ópticas de Plástico Multinúcleo», Bilbao, 2013.
- [25] M. Nakazawa, M. Yoshida, y T. Hirooka, «Nondestructive measurement of mode couplings along a multi-core fiber using a synchronous multi-channel OTDR», Japón, Mayo 2012.
- [26] [En línea] <http://www.berkshirephotonics.com/products/optical-fiber/>. Fecha último acceso: Septiembre 2015.
- [27] [En línea] <http://www.fiberfin.com/index.php/medical-html>. Fecha último acceso: Septiembre 2015.
- [28] D. J. Richardson, J. M. Fini y L E. Nelson, «Space Division Multiplexing in Optical Fibres», Nueva Jersey.

Anexos

Anexo I. Efectos limitantes de la fibra óptica

En el presente anexo se explican dos de los parámetros limitantes más característicos de una fibra óptica, como son la atenuación y la dispersión. Los parámetros estudiados serán de gran importancia en el conjunto del trabajo.

Atenuación

Se denomina atenuación a la pérdida de potencia óptica en transmisión. Su valor viene determinado por la contribución de diferentes efectos cuya dependencia con la longitud de onda utilizada es diferente como son la absorción, mediante la cual la energía luminosa se transforma en otro tipo de energía; la difusión, que hace que la energía luminosa guiada se convierta en energía luminosa radiada debido a que ésta viaja por un material diferente del vacío; y la radiación, que transforma la energía luminosa guiada en energía luminosa radiada debido a los efectos de curvatura en la fibra o de imperfecciones periódicas en ésta. En este último tipo de atenuación, los modos de orden inferior que se propagan por la fibra, es decir, los más confinados, sufrirán menos pérdidas. La atenuación de un determinado tramo de fibra se define como:

$$\alpha = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right)$$

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

Este fenómeno es limitante a la hora de establecer comunicaciones mediante fibra óptica. En la Figura I.1 se muestra una gráfica de la dependencia de la atenuación con la longitud de onda de trabajo en una FOP-SI, fabricada de polimetilmetacrilato (PMMA):

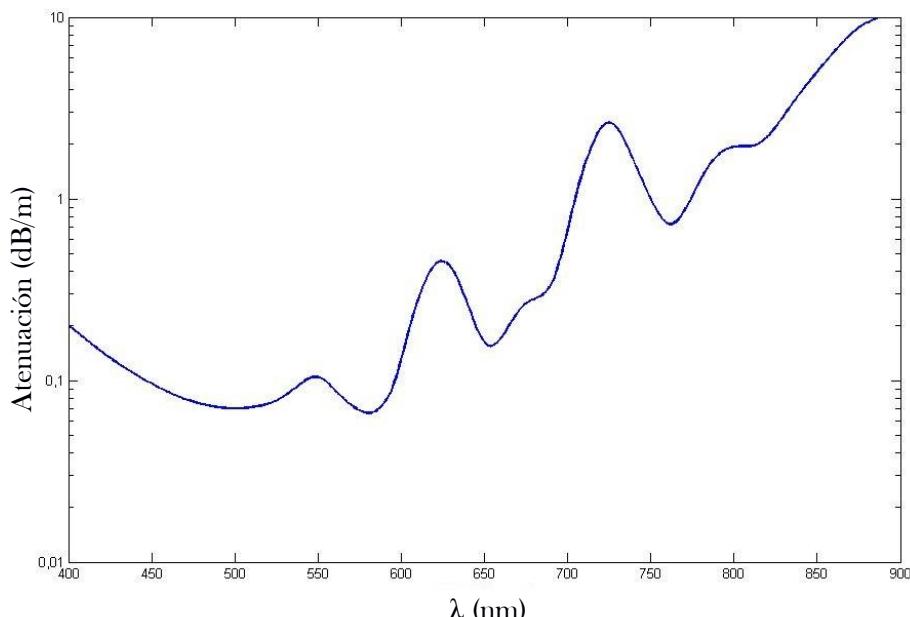


Figura I.1. Dependencia entre la atenuación y la longitud de onda en una FOP-SI fabricada con PMMA.

El efecto más importante a la hora de hablar de atenuación es intrínseco y viene dado por la absorción, en concreto por la presencia de iones OH- originados por la humedad existente en el proceso de fabricación. La frecuencia de resonancia de estos iones se encuentra en 2,73um, apareciendo su primer armónico en 1,365nm. Estas frecuencias se combinan con las propias del Si-O, dando lugar a un pico en 1,39nm, justo en el centro de la zona de atenuación mínima. Actualmente existen fibras especializadas con el objetivo de reducir al máximo el efecto de atenuación en esta longitud de onda.

Dispersión

Se denomina dispersión a la diferencia en la velocidad de propagación de diferentes componentes de la potencia óptica. El efecto más notable en las fibras ópticas de plástico es el de la dispersión intermodal, ocasionado por la diferencia en la velocidad de los modos propagándose por ésta y que se estudia mediante óptica geométrica. No obstante, también aparecen efectos de dispersión cromática o de polarización, pese a que su presencia es mucho menor que la de la dispersión modal.

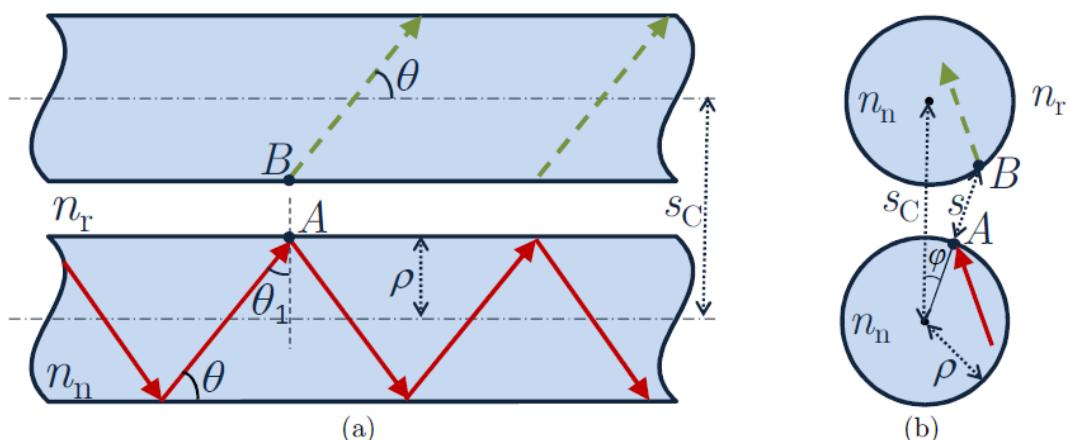
Se propone el uso de FOP-IG para compensar las velocidades de propagación de los modos, construyéndose así fibras con núcleos de índice gradual que permiten atenuar las limitaciones por dispersión intermodal y alcanzar tasas de Gbps en las mismas distancias.

La dispersión provoca un ensanchamiento progresivo de los pulsos transmitidos, lo que origina un solape entre éstos si están lo suficientemente próximos, limitando por ello la tasa de transmisión en función de la distancia del enlace.

Anexo II. Efecto de diafonía entre núcleos de una FOP-MN o *crosstalk*

Se denomina diafonía al efecto de acople entre los modos que viajan por diferentes núcleos de una fibra. Este fenómeno es característico de las FOP-MN, y la potencia que viaja por un modo puede acoplarse a otro modo de un núcleo cercano y propagarse a través de él.

Cuando la luz viaja por un núcleo que está próximo a otro, parte de la potencia se transfiere mediante campos evanescentes debidos al fenómeno de reflexión total interna frustrada. Como consecuencia de este mecanismo, cuando un rayo que viaja dentro de un núcleo (denominado rayo radiante) alcanza la interfaz núcleo-revestimiento, parte de su potencia se refleja y el resto se transmite. Esta potencia que se transmite, puede acoplarse a un núcleo cercano dando lugar a la diafonía (rayos acoplados). En la Figura II.1 se muestra el caso descrito:



II.1. (a) Un rayo radiante que viaja a lo largo del núcleo inferior (flechas rojas) genera rayos acoplados en el núcleo superior (flechas verdes); (b) Parámetros de los rayos proyectados en la sección transversal de los núcleos. n_n es el índice de refracción de los núcleos, n_r es el índice de refracción del revestimiento, θ es el ángulo axial del rayo, θ_1 es el ángulo complementario al axial, ρ es el radio de los núcleos, s_C es la distancia de separación que existe entre los centros de los núcleos, A es el punto de rebote de rayo radiante, B es el punto de acoplamiento, s es la distancia de separación entre los puntos A y B , y ϕ es el ángulo entre la línea que une los centros de los núcleos y la línea que va desde el centro del núcleo radiante hasta el punto A .

Existen varios modelos de trazado de rayos modelando la diafonía entre varias fibras monomodo, extrapolables al caso de trabajar con núcleos. Sin embargo existe un modelo de quasi-trazado de rayos desarrollado por Kapany y extendido por Cherim-Murphy y Maekawa-Sumida, basado en expresiones analíticas de tipo integral y que describe la diafonía en un haz formado por una fibra central rodeada de más fibras dispuestas en un anillo alrededor de ella, representando el caso de una FOP-MN de un solo anillo. No obstante cuenta con varias limitaciones, ya que solo se tienen en cuenta los rayos meridionales y las expresiones analíticas están sujetas a que solo se ilumine la fibra central en la cara de entrada del haz.

La diafonía puede provocar efectos indeseados en determinadas aplicaciones de la FOP-MN, como sucede en las orientadas al sensado de imagen como es la endoscopía. Es por ello que el control de este fenómeno se torna importante a la hora de trabajar en este campo, ya que las imágenes obtenidas pueden verse afectadas en términos de contraste o nitidez.

Anexo III. *Laser Beam Profiler LEPAS-12*

Laser Beam Profiler LEPAS-12

Analyzes various optical beam parameters with high sensitivity and high resolution in VIS to NIR range!

Features

- Minimum of 5 nm⁻¹ reading resolution
- High precision measurement by a high dynamic range (1: 1000 or better^{*2})
- Pulse light measurement is possible
- Fine tuning of exposure time is possible^{*3}

*1: Using C9664-01G02 and A4859-02 *2: Integration processing, smoothing processing *3: Tuning by exposure time of digital camera

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

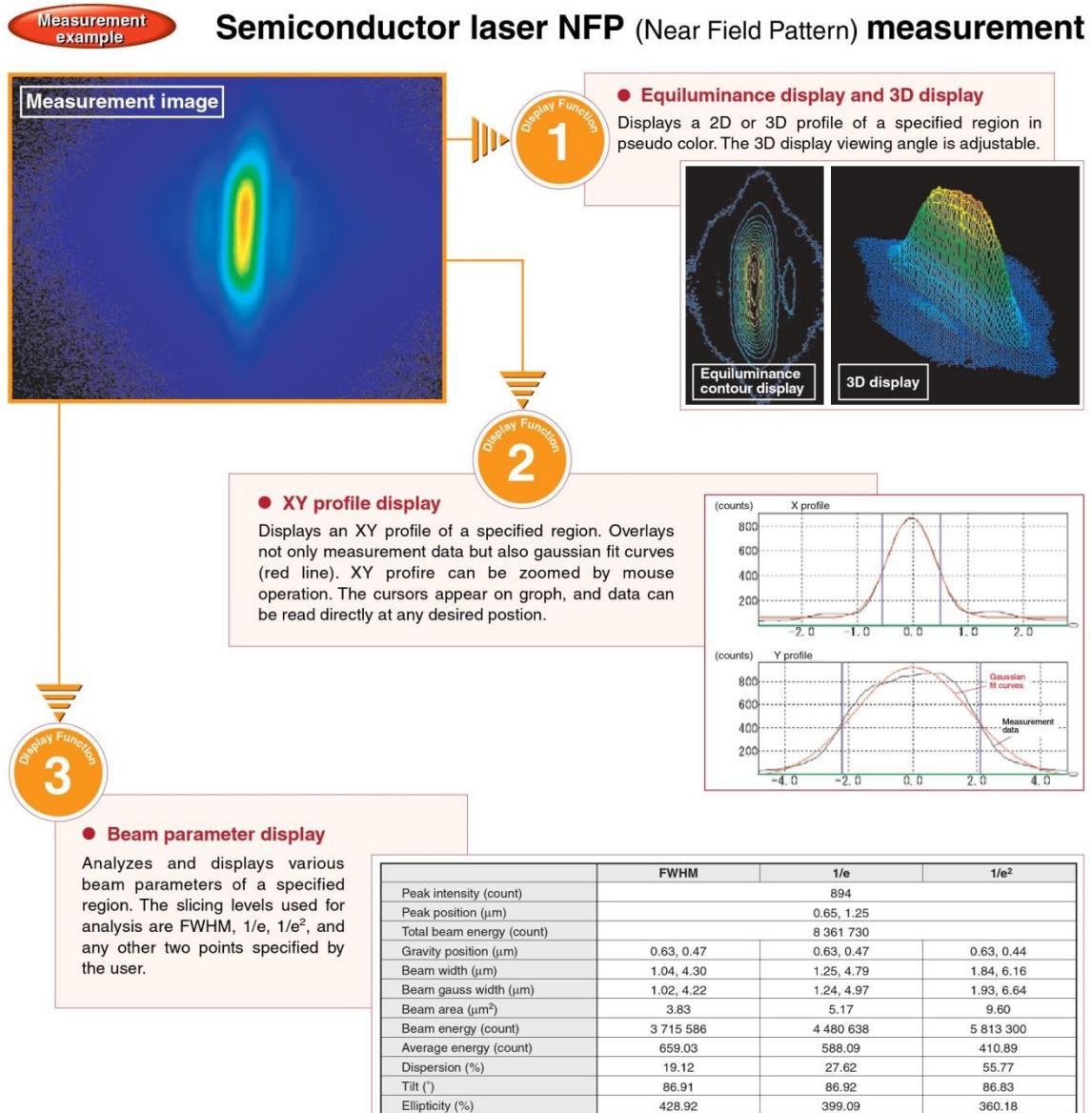
Laser Beam Profiler LEPAS-12 for digital camera

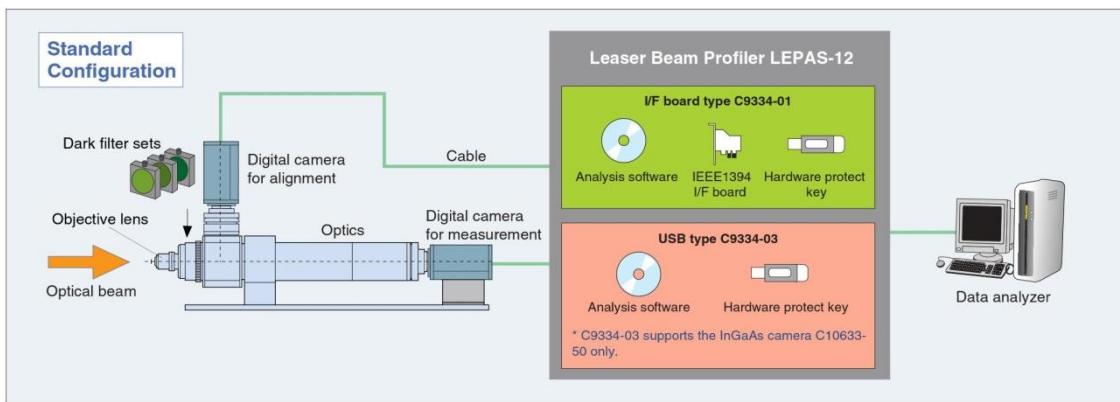
The Laser Beam Profiler LEPAS-12 is a key product for configuring an optical beam measurement system. Combining the LEPAS-12 with a dedicated optics and a digital camera allows high precision beam analysis using sophisticated functions. The LEPAS-12 supports high performance digital cameras for beam measurement with high spatial resolution over a wide dynamic range including pulsed light measurement. Besides displaying the measurement image, the LEPAS-12 verifies measurement and analysis results using the various display functions such as an equiluminance display, 3D display, XY profile display, and beam parameter display.

The LEPAS-12 supports different applications by selecting the optics!

| | |
|---|--|
| Semiconductor laser NFP/FFP measurement (Also supports infrared lasers) | Fiber N.A. measurement |
| LED pulse emission evaluation | Spatial beam measurement |
| Optical pickup beam measurement & evaluation | Measurement of high-power machining YAG lasers |

* See the LEPAS-12 Application Notes for detailed information on each application.





Functions

- High resolution measurement

Combination with a high resolution digital camera (C8484-05G02, C9664-01G02) can perform beam measurement with 1344 × 1024 pixels spatial resolution.

- High dynamic range measurement

1:1000 or more high dynamic range measurement is possible by combining with the digital camera of 12 bit A/D converter, and performing various smooth processings.

● External trigger function

By inputting the electrical pre-trigger which synchronized with pulse light, an pulse light image can be captured and analyzed synchronizing with emission timing.

- Multiple camera inputs

Using IEEE1394 camera I/F, Multiple camera connection is possible with an IEEE1394 HUB. By software operation, an active camera can be selected.

● Beam intensity adjustment function

The intensity value of the beam being displayed can be fine tuned by adjusting the digital camera exposure time. Precise analysis is possible by always optimizing the maximum intensity value for the beam.

- Automatic measurement function

When consecutive measurements are carried out on the same beam, the measurement conditions and measurement analysis procedures can be registered ahead of time, enabling a series of measurement analysis to be carried out with a single operation of the mouse.

● Simple connection

The camera connection only requires the IEEE 1394 I/F cable, and the AC adapter, camera cable and signal cable connections for analog camera systems are unnecessary.

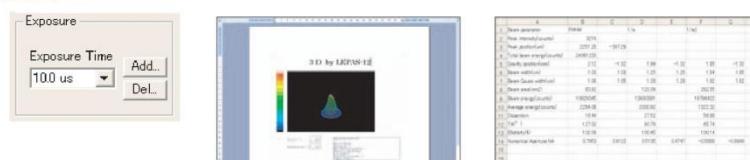
- Controllable from user applications

It is easily possible to carry out and control beam measurements from user applications by using the optional DLL software.

● Easy operation using Windows® XP/Vista/7

The software runs on Windows XP/Vista/7, making operation easy. Images can be saved in both Tiff and Text formats, and can be processed in using commercial image processing software such as Photoshop® and Paintshop.

In addition, beam parameters and XY profiles which have been analyzed can be saved in Text format, making it easy to carry out statistical processing using Excel® or another commercial spreadsheet software. Numerical data and profile data can be transmitted automatically to Excel.



Specification

● LEPAS-12

| | | |
|--------------------------------|---|--|
| Type number | C9334-01 | |
| Interface | IEEE1394-1995 | USB 2.0 |
| Video A/D | 12 bit | 14 bit |
| External trigger | TTL level/680 Ω | - |
| Image input function | Averaging: 1 time to 16 times, Dark subtraction: on/off | Averaging: 1 time to 4 times, Dark subtraction: on/off |
| Real-time monitor | Peak position, Peak intensity, FWHM, 1/e ² width, Total intensity, XY profile | Recording, Playback, Frame feed, Pause, Rewinding |
| Recording function | | |
| Automatic measurement function | Automatic measurement by using registered operation procedures | |
| Analysis function | FWHM, 1/e width, 1/e ² width, Width of any desired %, Peak intensity, Peak coordinates, Center of gravity coordinates, Surface area, Relative energy, Average brightness, Luminance dispersion, Beam tilt, Ellipticity, Distance between centers of gravity, Distance between any 2 points, N.A. | |
| Interpolation function | Sub-pixel processing (FWHM, 1/e width, 1/e ² width, any desired width) | |
| Region settings function | XY axis origin point, XY axis rotation, Rectangle or ellipse, Region rotation | |
| Display function | Live images, Acquired images, XY profiles, Gaussian fit XY profiles, Two-dimensional profiles, Three-dimensional profiles | |
| Calibration | Absolute length, Absolute angle, Gamma correction | |
| Output | External printers: Numerical data, Graph data, Image data, 2D data, 3D data | |
| Data transfer function | Automatic transfer to Microsoft Excel of numeric data, graph data, image data | |
| Saving of data | Numerical data/XY profile data: Text Image data: Tiff, Text | |
| Setting functions | All windows image: copy to clipboard Measurement conditions, Analysis conditions, Field setting conditions | |

* NFP system is upgradable to FFP.

Can not use the C9334-01 and the C9334-03 at the same time.

Camera specification

Digital CCD Camera

C8484-05G02



The C8484-05G02 is a high resolution, high sensitivity CCD camera that uses a 1.3 megapixel 2/3 inch interline CCD for which all pixels are readable. With its wide dynamic range, it is capable of high sensitivity imaging of light over a broad range from the visible to near infrared of 1100 nm.

| | |
|-------------------------|---|
| Imaging element | 2/3 inch interline CCD, all pixels read |
| Effective no. of pixels | 1344 (H) × 1024 (V) |
| Imaging area | 8.67 mm × 6.60 mm |
| Cell size | 6.45 μm × 6.45 μm |
| Wavelength range | 400 nm to 1100 nm |
| A/D converter | 12 bit |
| Lens mount | C-mount |
| Exposure time | 10 μs to 1 s |

Laser Measurement Digital CCD Camera

C9664-01G02



The C9664-01G02 is a 2/3-inch interline CCD camera developed specifically for laser beam measurement. The basic performance is the same as the C8484-05G02, but the CCD element carries out special processing to enable measurement of the laser beam without interference fringes occurring. Using this camera enables high precision laser measurement.

| | |
|-------------------------|---|
| Imaging element | 2/3 inch interline CCD, all pixels read |
| Effective no. of pixels | 1344 (H) × 1024 (V) |
| Imaging area | 8.67 mm × 6.60 mm |
| Cell size | 6.45 μm × 6.45 μm |
| Wavelength range | 400 nm to 1100 nm |
| A/D converter | 12 bit |
| Lens mount | C-mount |
| Exposure time | 10 μs to 1 s |
| Other function | Interference fringe countermeasure |

InGaAs Camera

C10633-50



The C10633-50 is a dedicated infrared camera for the LEPAS-12, it is the InGaAs camera with USB interface. This camera has 14 bit wide dynamic range and high sensitivity in infrared region from 900 nm to 1700 nm. Using this camera with IR interference fringes deletion optics A6502-10, it measures beam patterns without interference fringes.

| | |
|-------------------------|-------------------|
| Imaging element | InGaAs |
| Effective no. of pixels | 320 (H) × 256 (V) |
| Imaging area | 9.60 mm × 7.68 mm |
| Cell size | 30 μm × 30 μm |
| Wavelength range | 900 nm to 1700 nm |
| A/D converter | 14 bit |
| Lens mount | C-mount |
| Exposure time | 100 μs to 15 ms |

* LEPAS is a registered trademark of Hamamatsu Photonics K. K.

* Product and software package names noted in this documentation are trademarks or registered trademarks of their respective manufacturers.

- Subject to local technical requirements and regulations, availability of products included in this promotional material may vary. Please consult with your local sales representative.
- Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions.

Specifications and external appearance are subject to change without notice.

© 2011 Hamamatsu Photonics K.K.

HAMAMATSU

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Systems Division

812 Joko-cho, Higashi-ku, Hamamatsu City, 431-3196, Japan, Telephone: (81)53-431-0124, Fax: (81)53-435-1574, E-mail: export@sys.hpk.co.jp

U.S.A. and Canada: Hamamatsu Corporation: 360 Foothill Road, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1) 908-231-0960, Fax: (1)908-231-0852, E-mail: usa@hamamatsu.com

Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstr. 10, D-8221 Herrsching am Ammersee, Germany, Telephone: (49)8152-375-0, Fax: (49)8152-2658, E-mail: info@hamamatsu.de

France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 19, Rue du Saule Trapu, Parc du Moulin de Massy, 91882 Massy Cedex, France, Telephone: (33) 69 53 71 00, Fax: (33) 69 53 71 10, E-mail: info@hamamatsu.fr

United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited: 2 Howard Court, 10 Tewin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire, AL7 1BW, U.K., Telephone: (44) 1707-294888, Fax: (44) 1707-325777, E-mail: info@hamamatsu.co.uk

North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB: Smidesvägen 12, SE-171-41 Solna, Sweden, Telephone: (46)8-509-031-00, Fax: (46)8-509-031-01, E-mail: info@hamamatsu.se

Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.R.L.: Strada della Moia, 1 int.6-20020 Arese (Milano), Italy, Telephone: (39)02-935 81 733, Fax: (39)02-935 81 741, E-mail: info@hamamatsu.it

Cat. No. SOCS0007E04

SEP/2011 HPK

Created in Japan (PDF)

Anexo IV. Fibra de vidrio monomodo de visible utilizada en inyección

Corning® RGB 400 Specialty Optical Fiber



*Optimized
for visible
light spectral
range
applications*

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

Applications:

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

Features:

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

RGB 400

Key Optical Specifications

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Operating Wavelength (nm) | 450 - 700 |
| Fiber Cutoff Wavelength (nm) | 400 ± 50 |
| Maximum Attenuation @ 500 nm (dB/km) | ≤ 30 |
| Maximum Attenuation @ 600 nm (dB/km) | ≤ 20 |
| Mode-field Diameter @ 500 nm* (μm) | 3.2 ± 0.5 |
| Mode-field Diameter @ 600 nm* (μm) | 3.9 ± 0.5 |

Key Geometric, Mechanical and Environmental Specifications

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Cladding Outside Diameter (μm) | 125 ± 0.5 |
| Coating Outside Diameter (μm) | 245 ± 10 |
| Core-to-Cladding Offset (μm) | ≤ 0.3 |
| Standard Lengths | 500 m, 1 km, 2 km, 5 km |
| Proof Test (kpsi) | 100 or 200 |
| Operating Temperature (°C) | -60 to 85 |

Performance Characterizations*

| | |
|---------------------|------|
| Numerical Aperture | 0.12 |
| Index of Refraction | 1.46 |
| Core Diameter (μm) | 4.0 |

* Values in this table are nominal or calculated values

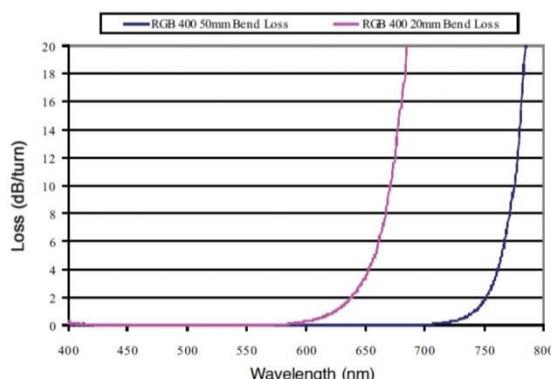


Figure 1

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

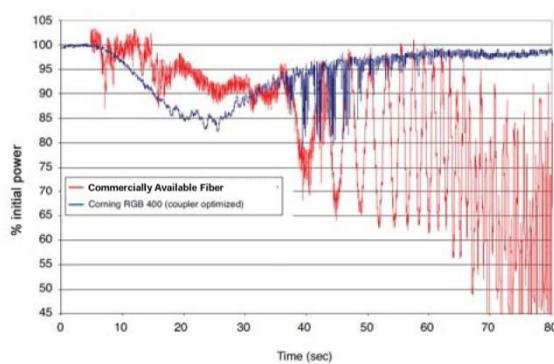


Figure 2

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

For more information about Corning's leadership in Specialty Fiber technology visit our website at www.corning.com/specialtyfiber

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

Corning Incorporated

Tel: +1-607-974-9974

Fax: +1-607-974-4122

E-mail: specialtyfiber@corning.com

© 2010 Corning Incorporated



Page 2

M0400016
Issued: March 2010
Supersedes: May 2006

Anexo V. FOP-MN utilizada

AsahiKASEI

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

Specifications for Plastic Optical Fiber

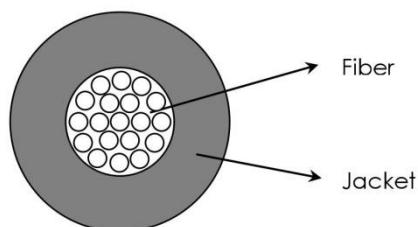
Multi-core POF SMCK-1000P

Issued on : April 1, 2013

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

1, STRUCTURE

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

2, PROPERTIES

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

3, RoHS certification

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

Sample conditions

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

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

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

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

Light Source : LED (Peak Wavelength = 657nm)
Transmission Rate ≥ 90%

Anexo VI. Software utilizado para el registro del campo lejano

Se ha utilizado LabView como entorno de trabajo para el registro del campo lejano, mediante un software ya existente en el grupo de trabajo del laboratorio de óptica y cuya interfaz gráfica y funcionamiento se explica a continuación en la Figura VI.1. A partir de estos datos se obtiene la AN, como se indica en el apartado 5.4.

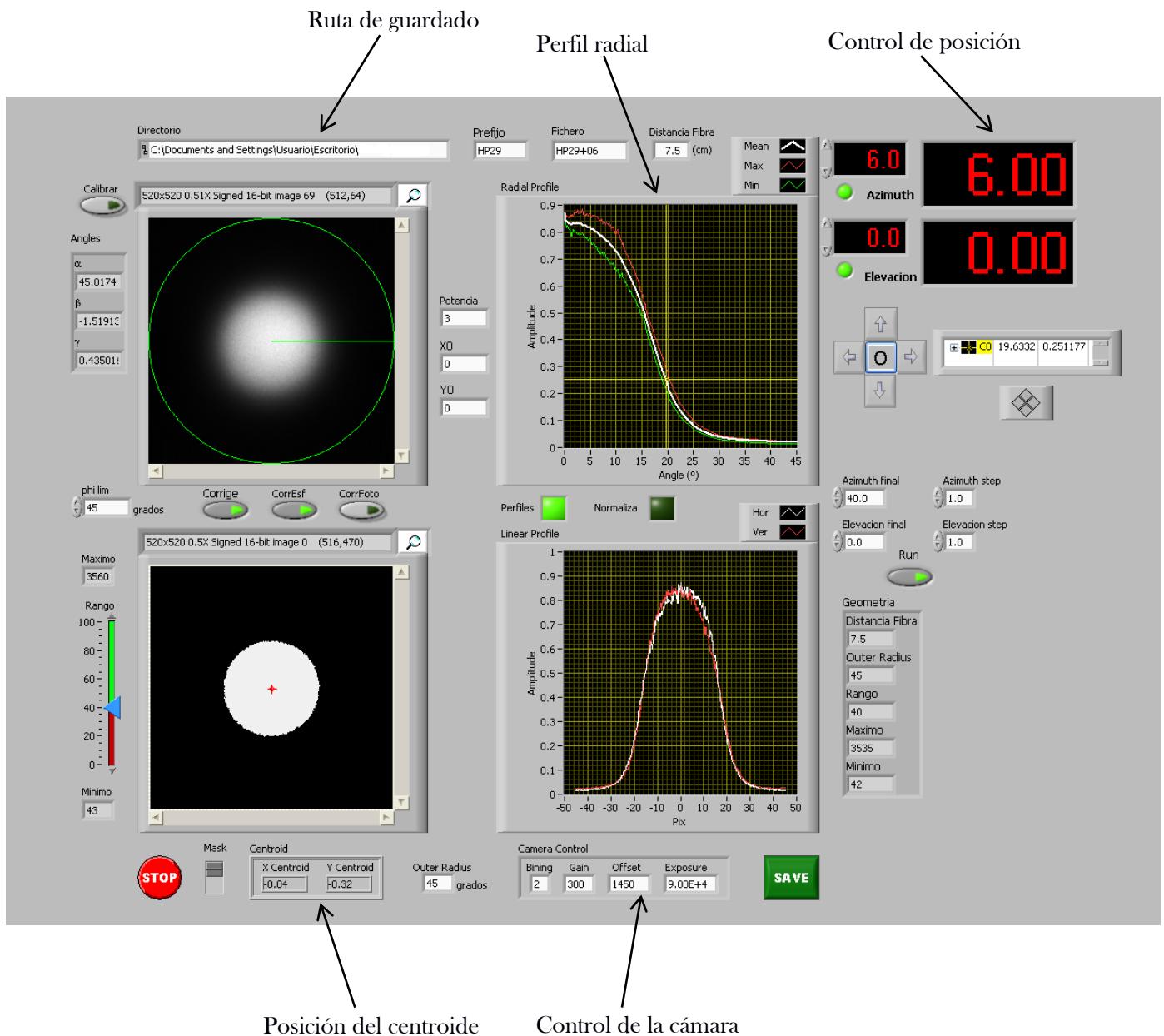


Figura VI.1. Interfaz gráfica del software de análisis de campo lejano.

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

Además, otros parámetros como la posición, la cámara, la ruta de guardado, las distancias correspondientes a las condiciones de medida o la posición del centroide pueden ser controlados. De especial interés es el último, observándose una variación en la posición del centroide a medida que la inyección se realiza en los diferentes núcleos de la FOP-MN.

Anexo VII. Preparación de los extremos de la fibra

La preparación de los extremos de la FOV difiere de la aplicada para la FOP-MN. En el primer caso se realiza un primer pelado de la fibra para eliminar el recubrimiento de acrilato, de alrededor de 45 mm o 1,5 pulgadas de longitud. Posteriormente y para completar el proceso de pelado, el extremo en cuestión es limpiado con alcohol para eliminar los restos de impurezas que hayan podido quedar. La peladora utilizada es del tipo MSI y se muestra en la Figura 5.1.

Tras el pelado, se procede a realizar el corte en la FOV. Un corte correcto debe ser limpio y transversal, por lo que se utiliza una cortadora específica. El proceso de corte consiste en realizar una pequeña incisión perpendicular a la fibra, mediante la punta de carbono de la cortadora. La fibra es posteriormente sometida a una cierta tensión, de manera que cuando ésta es suficiente se produce una fractura secuencial de sus enlaces atómicos en la dirección de la incisión, de esta forma la fractura es plana y perpendicular a la fibra. La cortadora utilizada, al igual que la peladora, es mostrada en la Figura VII.1:

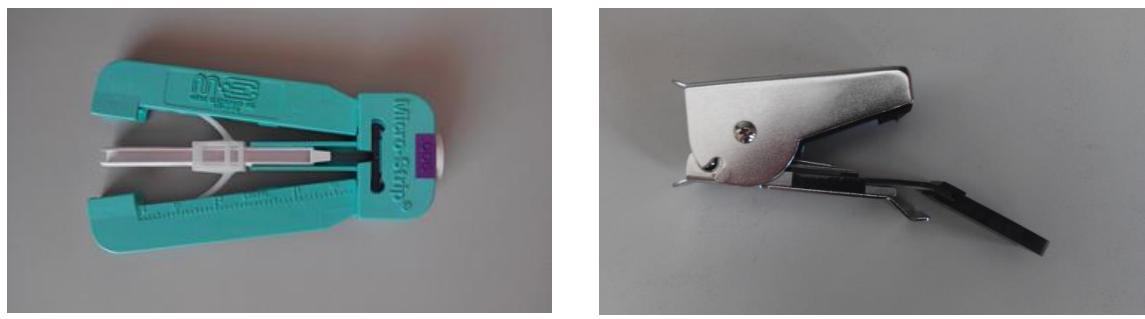


Figura VII.1 (a) Peladora de fibra óptica de vidrio; (b) Cortadora de fibra óptica de vidrio.

En cuanto a la preparación de los extremos de la FOP-MN, la diferencia radica en el cambio de orden entre pelado y cortado, ya que para cualquier tipo de FOP en primer lugar se realiza el corte. Este proceso es sustancialmente diferente del seguido en el corte de las FOV, ya que la herramienta a utilizar emplea una técnica distinta para seccionar la fibra. En esta ocasión se realiza un corte simple perpendicular a la fibra omitiendo la incisión realizada para las FOV, haciendo uso de herramientas que también varían respecto al primer tipo de fibra. Para este corte se ha utilizado una cortadora para POF simple y doble de 1,5 y 2 mm de diámetro, mostrada en la Figura VII.2.

El pelado se realiza una vez que la fibra ya está cortada y la herramienta utilizada es de nuevo del tipo MSI, pero con un diámetro adecuado para el nuevo tipo de fibra. Dicha peladora se muestra junto con la cortadora en la Figura VII.2:

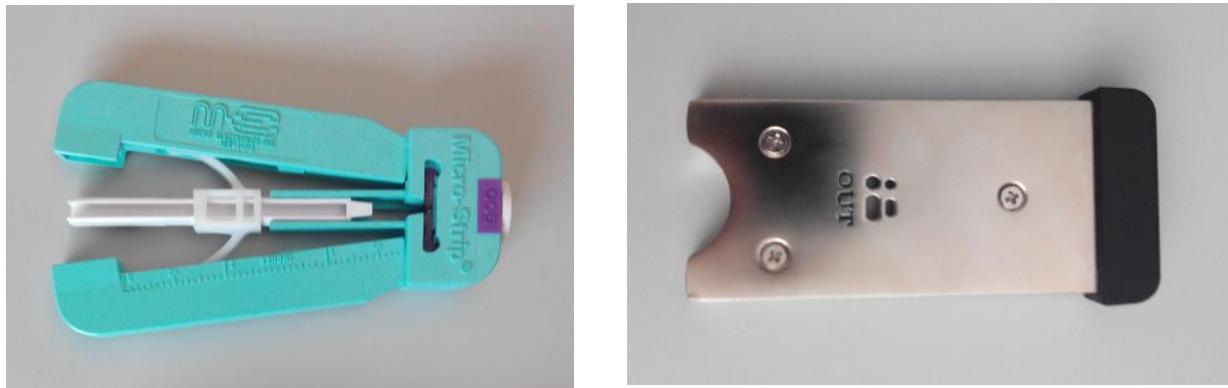


Figura VII.2 (a) Peladora de fibra óptica de plástico; (b) Cortadora de fibra óptica de plástico.

En el caso de las FOP se añade una etapa final que debido al fin que se persigue en este trabajo, será de suma importancia. Tras el pelado, es necesario realizar un pulido de ambos extremos de la FOP-MN para uniformizar sus superficies y que el corte transversal de los núcleos quede más limpio y definido, facilitando así tanto el proceso de inyección como la calidad de las imágenes tomadas en campo cercano.

El sistema de pulido consta de dos lijas, una de grano duro (*2000-grit polishing paper*) y otra de grano fino (*3 μ m polishing paper*), un líquido especial para posibilitar el lijado y un disco para soportar la fibra durante éste, de forma que la FOP-MN se sitúe perpendicularmente a la superficie. La metodología se basa en realizar una serie de repeticiones de un movimiento curvo, generalmente en forma de ‘8’, primero sobre el papel de grano duro y posteriormente sobre el de grano fino, ambos impregnados en líquido de pulido. Los componentes de este sistema se muestran en la Figura VII.3:

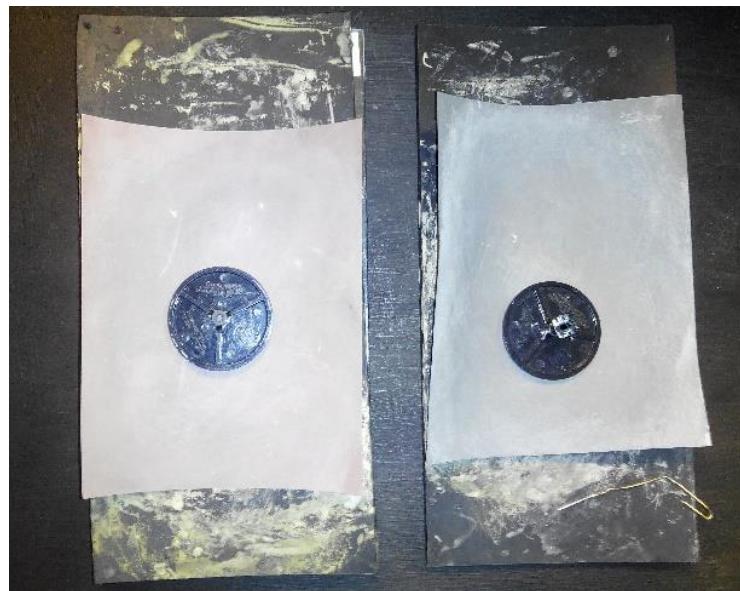


Figura VII.3. Papel de lija de grano fino (izquierda) y de grano duro (derecha).