

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**Estudio de patrones de speckle aplicados a
la medida de desplazamiento y posición
(Study of speckle patterns applied to the
measurement of displacement and position)**

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Jesús Ramón Abascal Santamaría

Febrero - 2013



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Jesús Ramón Abascal Santamaría

Director del PFC: Mauro Lomer Barboza

Título: “Estudio de patrones de speckle aplicados a la medida de desplazamiento y posición”

Title: “Study of speckle patterns applied to the measurement of displacement and position”

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Cobo García, Adolfo

Secretario (Apellidos, Nombre): Lomer Barboza, Mauro

Vocal (Apellidos, Nombre): Martínez Solórzano, Mar

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera N°
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Mauro Lomer Barboza, la ayuda prestada y su participación en todo momento, durante el desarrollo de este proyecto.

También quiero dar las gracias por el apoyo que me han ofrecido y la confianza que depositarán sobre mí a mis amigos y a mi familia, especialmente a mi Abuelo, que espero que se recupere pronto.

Por último, quizás por ser lo más importante, me gustaría agradecer a la persona más especial que tengo a mi lado, mi novia Laura, por ser siempre mi apoyo incondicional, por dibujar sonrisas en mi día a día, compartir conmigo los buenos y malos momentos, por hacerme ver la vida con otros ojos y no dejar que me rinda nunca.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 2: FENÓMENO DE SPECKLE	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. FENÓMENOS DE LA LUZ	6
2.2.1. Reflexión y refracción	6
2.2.2. Difracción.....	8
2.2.3. Dispersión de la luz	9
2.2.4. Absorción	11
2.2.5. Interferencia	11
2.2.6. Coherencia.....	13
2.2.6.1. Longitud de Coherencia	16
2.3. FIBRA ÓPTICA	20
2.3.1. Introducción.....	20
2.3.2. Características	20
2.3.2.1. Índice de Refracción	21
2.3.2.2. Apertura Numérica.....	22
2.3.3. Propiedades	23
2.4. CARACTERÍSTICAS DEL FENÓMENO SPECKLE.....	26
2.4.1. Generación de speckle	26
2.4.2. Tipos de speckle	27
2.4.3. Análisis estadístico.....	27
2.4.4. Speckle en fibras multimodo	29
2.4.5. Ruido Modal	31
2.4.6. Metrología Speckle	32
2.4.7. Técnicas de procesamiento de patrones de speckle	32
2.4.7.1. Historia Temporal de Patrones de Speckle [THSP]	33
2.4.7.2. Métodos para el Análisis del Contraste Speckle	33
2.4.7.3. Métodos basados en Diferencias.	33
2.4.7.4. Métodos basados en análisis de textura.....	34
2.4.7.5. Conclusion sobre los tipos de métodos.	34

CAPÍTULO 3: TÉCNICAS DE PROCESADO.....	36
3.1. INTRODUCCIÓN	36
3.2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....	37
3.2.1. <i>Momentos de primer orden</i>	38
3.2.2. <i>Momentos de segundo orden</i>	38
3.2.3. <i>Matriz de coocurrencia de niveles de gris</i>	39
3.2.4. <i>Función autocorrelación</i>	44
3.2.5. <i>Otros métodos de análisis</i>	45
3.3. CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS	46
 CAPÍTULO 4: MEDIDA DEL DESPLAZAMIENTO.....	 48
4.1. INTRODUCCIÓN	48
4.2. FUNDAMENTO TEÓRICO	49
4.3. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	54
4.3.1. <i>Laser de gas de Helio - Neón</i>	54
4.3.2. <i>Fibra óptica utilizada</i>	55
4.3.3. <i>Desplazador micrométrico</i>	57
4.3.4. <i>Cámara de captura</i>	58
4.3.5. <i>Software del ordenador</i>	59
4.3.5.1. Procesamiento de datos.....	60
4.4. PRUEBAS PRELIMINARES	61
4.4.1. <i>Métodos estáticos</i>	61
4.4.1.1. Medida del desplazamiento mediante la correlación de los patrones de speckle individuales.....	61
4.4.1.2. Matriz de coocurrencia de niveles de gris de patrones de speckle individuales	62
4.4.1.3. Métodos de las diferencias	63
4.4.1.4. Otros métodos implementados	64
4.4.2. <i>Métodos dinámicos</i>	65
4.5. MONTAJE IMPLEMENTADO.....	66
 CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES	 69
5.1. CONDICIONES DE MEDIDA	69
5.2. RESULTADOS CON FIBRA DE 1MM	71
5.3. RESULTADOS CON FIBRA DE 250 μ M	79
5.4. RESULTADOS CON FIBRA DE 50 μ M	90
5.5. RESUMEN DE LOS RESULTADOS	96

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	99
6.1. CONCLUSIONES OBTENIDAS	99
6.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	102
REFERENCIAS.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Implementación del sistema de medida	2
Figura 2.1 Fenómeno de reflexión y refracción	7
Figura 2.2 Importancia del ángulo de incidencia	8
Figura 2.3 Difracción de las ondas al atravesar una rejilla.....	9
Figura 2.4 Ejemplo del fenómeno de dispersión	9
Figura 2.5 Ejemplo dispersión de Rayleigh	10
Figura 2.6 Efecto de interferencia	13
Figura 2.7 Tipos de fuente de luz. A) Fuente Incoherente. B) Fuente Coherente.	14
Figura 2.8 Trenes de dos ondas iguales.....	14
Figura 2.9 Función contraste.....	15
Figura 2.10 Distribución espectral del láser	17
Figura 2.11 (a) Amplitudes u_1 y u_2 del campo. (b) Distribución de la intensidad.	18
Figura 2.12 Componentes principales que integran la fibra óptica	20
Figura 2.13 Perfiles de índice. (A) Salto de índice. (B) Índice gradual parabólico.	21
Figura 2.14 Representación del ángulo crítico	23
Figura 2.15 Representación de las tres ventanas de emisión	24
Figura 2.16 Propagación de la luz. (A) Fibra de salto de índice. (B) Fibra de índice gradual. ...	25
Figura 2.17 Ejemplo de patrón de speckle	26
Figura 2.18 Tipos de speckle. (a) Speckle Objetivo. (b) Speckle subjetivo.....	27
Figura 2.19 Densidad de probabilidad de la intensidad	28
Figura 2.20 Intensidad del speckle obtenido en fibra multimodo.	30
Figura 3.1 Direcciones de la matriz de coocurrencia	39
Figura 3.2 Contenido matricial de la imagen de ejemplo.....	39
Figura 3.3 Métodos espectrales. (a) Patrón speckle sin movimiento y (b) su transformada de Fourier. (c) Patrón speckle con movimiento y (d) su transformada de Fourier.	46
Figura 4.1 Fluctuaciones del speckle al perturbar la fibra.	48
Figura 4.2 Representación de la NIP en función de la desviación máxima de fase	52
Figura 4.3 Sistema de rodillos que implementan el dispositivo de desplazamiento	52
Figura 4.4 Desplazamiento y elongación	53
Figura 4.5 Láser He-Ne utilizado en las medidas	54
Figura 4.6 Representación del funcionamiento del Láser He-Ne.....	55
Figura 4.7 Tramo de fibra óptica utilizada como sensor	56
Figura 4.8 Ilustración del sistema implementado para el desplazamiento	57
Figura 4.9 Representación esquemática de la cámara de captura	58
Figura 4.10 Correlación de los patrones de speckle	61
Figura 4.11 Descriptores de la matriz de coocurrencia	62
Figura 4.12 Diferencia de patrones de speckle.....	63
Figura 4.13 Resultados de la correlación de la resta entre patrones.....	63
Figura 4.14 Filtrado mediante detección de bordes	64
Figura 4.15 Evolución de un grano del patrón de speckle	64
Figura 4.16 Energía de la matriz promediada en el tiempo.....	65

Figura 4.17 Esquema global del montaje implementado	66
Figura 4.18 Montaje experimental de proyecto.....	67
Figura 5.1 Patrón de speckle de una muestra e histograma.....	71
Figura 5.2 Evolución del contraste de la matriz	71
Figura 5.3 Evolución de la correlación de la matriz.....	72
Figura 5.4 Evolución de la energía de la matriz.....	72
Figura 5.5 Ajuste de la energía mediante polinomios	73
Figura 5.6 Error residual de las aproximaciones.....	74
Figura 5.7 Representación de los errores absolutos en Energía	75
Figura 5.8 Respuesta final del sistema de desplazamiento	76
Figura 5.9 Evolución de la Energía del ruido.....	77
Figura 5.10 Repercusión del ruido en el sistema.....	78
Figura 5.11 Patrón de speckle de la fibra e histograma.....	80
Figura 5.12 Evolución del contraste de la matriz.....	80
Figura 5.13 Evolución de la correlación de la matriz.....	81
Figura 5.14 Evolución de la energía de la matriz.....	81
Figura 5.15 Rango de linealidad de la fibra	82
Figura 5.16 Evolución del contraste (2 μ m de paso).....	83
Figura 5.17 Evolución de la correlación (2 μ m de paso)	84
Figura 5.18 Evolución de la energía (2 μ m de paso)	84
Figura 5.19 Rango lineal de la energía.....	85
Figura 5.20 Ajuste de los puntos mediante una recta	86
Figura 5.21 Respuesta final del sistema (Fibra de 250 μ m).....	87
Figura 5.22 Variación del ruido de la fibra	88
Figura 5.23 Repercusión del ruido en el sistema.....	89
Figura 5.24 Patrón de speckle fibra de 50 μ m e histograma	90
Figura 5.25 Contraste de la matriz (fibra 50 μ m).....	91
Figura 5.26 Correlación de la matriz (fibra 50 μ m)	91
Figura 5.27 Energía de la matriz (fibra 50 μ m).....	92
Figura 5.28 Ajuste de los puntos por una recta	93
Figura 5.29 Respuesta final del sistema implementado	94
Figura 5.30 Evolución de la energía del ruido (fibra 50 μ m).....	95
Figura 5.31 Repercusión del ruido en el sistema con fibra de 50 μ m	96
Figura 5.32 Respuesta del sistema con los 3 tipos de fibra utilizada.	97
Figura 6.1 Sensibilidad de las fibras ópticas	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Plantilla de la Matriz de Coocurrencia	40
Tabla 3.2 Matriz de Coocurrencia en dirección [1,0]	40
Tabla 3.3 Cálculo de Matriz de Coocurrencia simétrica	41
Tabla 3.4 Matriz de probabilidad de coocurrencia	41
Tabla 3.5 Descriptores de Haralick	42
Tabla 3.6 Descriptores de Haralick	43
Tabla 4.1 Características del láser utilizado	55
Tabla 4.2 Número de modos de las fibras utilizadas	57
Tabla 5.1 Ecuaciones de los polinomios del ajuste	74
Tabla 5.2 Error máximo de cada ajuste	75
Tabla 5.3 Ecuación de la recta del ajuste	86
Tabla 5.4 Errores a la entrada y salida del sistema	87
Tabla 5.5 Ecuación de la recta ajustada	93
Tabla 5.6 Errores en la entrada y salida del sistema	94
Tabla 6.1 Análisis de la linealidad de las fibras	99
Tabla 6.2: Características del sistema	100

1

CAPÍTULO

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación del proyecto

La motivación principal de este proyecto está fundamentada principalmente en desarrollar un sistema de medida de desplazamiento utilizando el patrón de speckle que se genera en fibra óptica multimodo.

Básicamente, se intenta implementar un sistema de medida sencillo que permita obtener de manera eficiente una relación entre el patrón de speckle generado y el desplazamiento realizado. Dada la naturaleza aleatoria que presenta dicho patrón, se trabaja con descriptores que permiten el análisis de texturas. Más concretamente, se utilizará la matriz de coocurrencia y sus descriptores básicos para modelar el comportamiento de los patrones de speckle y de esta manera encontrar la respuesta al sistema que lo relacione con el desplazamiento que se le aplica a la fibra óptica.

El sistema que se pretende desarrollar, debe incluir un elemento emisor de luz coherente como puede ser una fuente tipo láser. También debe contar con un tramo de fibra óptica, la cual se encargará de recoger los desplazamientos aplicados y generar un patrón de speckle a su salida que será capturado por una cámara web de uso doméstico. Existe otro elemento que se debe incorporar en el montaje del sistema, y es el dispositivo encargado de realizar los desplazamientos micrométricos a través de un tornillo micrométrico.



Figura 1.1 Implementación del sistema de medida

Resulta interesante poder desarrollar un sistema que permita medir estos desplazamientos tan pequeños pues puede ser de gran utilidad para diseñar sensores.

La creciente evolución de la tecnología en todos sus aspectos, así como de la maquinaria robótica que se utiliza hoy en día en las industrias y en especial, en las cadenas de montajes propicia posibles aplicaciones ante desplazamientos micrométricos o ante posibles vibraciones que puedan ser captadas.

1.2. Objetivos específicos

Se analizan los problemas propuestos anteriormente y se investigan los métodos de implementación a desarrollar que resulten sencillos pero a la vez eficientes, lo que permite un diseño muy simplificado. A continuación, se procede a describir los objetivos clave para la realización de este proyecto.

- El principal objetivo se basa en obtener la correlación entre el speckle y el desplazamiento mediante el procesamiento de imágenes que se capturan al aplicar dicha perturbación en la fibra.
- La caracterización principal y procesamiento de los patrones de speckle se realiza mediante la matriz de coocurrencia que es una técnica para el análisis de texturas.

Una vez que se han conseguido los objetivos principales, se puede fijar una serie de objetivos secundarios.

- Se debe obtener una respuesta lo más lineal posible y con el mayor rango dinámico admisible.
- El sistema debe ser bastante sensible al desplazamiento, pero nulo ante perturbaciones externas que afecten negativamente a las medidas.
- Se debe realizar un ajuste de la curva para hallar la respuesta del sistema de medida. Como conviene que la respuesta sea lo más lineal posible, se utiliza para el ajuste la ecuación de una recta.
- El sistema debe mostrar una respuesta con buena precisión y buena exactitud a la hora de obtener las medidas.
- La implementación del sistema debe ser sencilla y con componentes de bajo coste para permitir el desarrollo de sensores de desplazamientos baratos.
- El procesamiento de los patrones de speckle debe ser lo más sencillo posible para reducir el tiempo de cómputo.

Las principales características que tiene que incorporar el sistema a implementar deben satisfacer en la mayor medida posible los objetivos anteriormente mencionados, sin olvidar que el objetivo principal es caracterizar la naturaleza aleatoria que presenta el patrón de speckle y encontrar una relación con el desplazamiento que se aplica en la fibra óptica.

2

CAPÍTULO

2. FENÓMENO DE SPECKLE

2.1. Introducción

Desde la invención del láser a principio de los años 60, se revolucionó la metrología óptica existente, y se promovió el desarrollo y aplicación de nuevas técnicas. Cuando la luz de una fuente altamente coherente se transmite a través de un objeto difusor, o se dispersa en uno rugoso, produce patrones de interferencia en forma de granos, conocido como “moteado” o patrón de “speckle” [1].

El fenómeno de speckle ha sido extensamente estudiado desde la irrupción del láser. Así, Ridgen y Gordon [2] fueron los primeros en analizar dicho efecto, que en aquellos tiempos, se presentaba como un efecto indeseado, porque afectaba a la resolución de las mediciones. Los primeros trabajos se concentraron en tratar de reducir o eliminar su influencia [3].

Poco después se empezó a estudiar sus causas [4] y no se tardó mucho tiempo en encontrarle aplicaciones prácticas, como la medición de velocidad [5] y [6]. Otro campo donde ha tenido gran éxito la metrología con speckle ha sido en la medida de rugosidades para diversas aplicaciones, tales como la medida de la rugosidad del papel basado en el análisis de la textura del patrón de speckle [7]. También se han desarrollado trabajos en relación al desplazamiento en fibras ópticas. Se puede destacar el estudio de desplazamientos micrométricos en fibra multimodo mediante el producto interno del campo de speckle [8].

Posteriormente, se realizó un nuevo trabajo para variar el rango de medida del desplazamiento basado en fibra multimodo con núcleos heterogéneo, que permitía mejorar la sensibilidad de la medida [9] pero siempre con equipos de alto coste.

Como conclusión, la metrología speckle o interferometría speckle puede ser aprovechada para obtener información relevante sobre los objetos, tales como velocidad, vibración, desplazamiento, etc. Una gran cantidad de estudios están relacionados con la simple dispersión de la luz a través de la superficie de objetos inanimados, pero el fenómeno de speckle dinámico también puede ser observado en objetos vivos, tales como tejido, o cualquier otro material que presente cierta actividad biológica. En este caso, nosotros nos centraremos en la medida de desplazamientos y vibraciones aplicadas en la fibra óptica para generar la variación del patrón de speckle que se después será procesado.

2.2. Fenómenos de la luz

Antes de empezar a analizar la naturaleza de los patrones de speckle, se deben explicar algunas propiedades características de la luz, para posteriormente entender correctamente la formación y generación de patrones speckle.

Existen tres procesos foto-físicos que afectan especialmente a la propagación de la luz en un medio:

- **Refracción y reflexión:** se produce cuando la luz incide en la frontera de dos materiales con índices refractivos diferentes.
- **Difracción:** se trata de un fenómeno ondulatorio que se produce cuando la luz atraviesa irregularidades, tales como obstáculos o agujeros.
- **Dispersión** (en inglés *scattering*): se produce cuando la luz encuentra una no-uniformidad localizada en el medio de propagación, forzándola a cambiar de dirección.
- **Absorción:** se produce cuando una partícula o molécula extrae energía de la luz, produciendo una transición de un estado cuántico de dicha partícula a otro de mayor energía.

2.2.1. Reflexión y refracción

La reflexión y refracción de la luz, se produce cuando ésta pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, es decir, entre dos materiales con distinto índice de refracción, sufriendo un cambio de velocidad y un cambio de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie. Ésta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la ley de Snell. Esta ley, así como la refracción en medios no homogéneos, son consecuencia del principio de Fermat, que indica que la luz se propaga entre dos puntos siguiendo la trayectoria de recorrido óptico de menor tiempo.

Por otro lado, la velocidad de la penetración de la luz en un medio distinto del vacío está en relación con la longitud de la onda y por tanto, cuando un haz de luz blanca pasa de un medio a otro, cada color sufre una ligera desviación. Este fenómeno es conocido como dispersión de la luz que se analizará posteriormente.

En la figura 2.1 se ilustra un ejemplo de un rayo reflejado y de un rayo refractado. A través de este esquema se formula la ley de Snell, que depende de los índices de refracción y de los ángulos que forman dicho rayos.

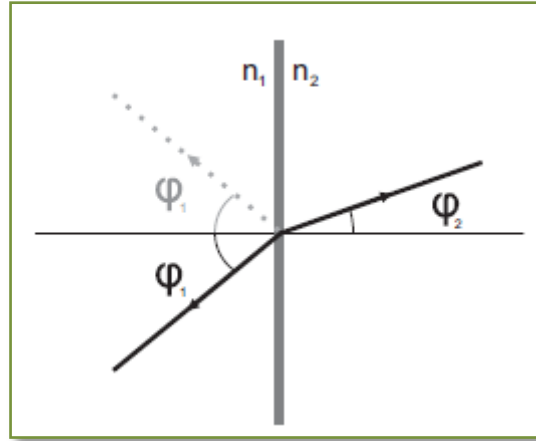


Figura 2.1 Fenómeno de reflexión y refracción

La ley de Snell formula que la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio, o bien, puede entenderse que el producto del índice de refracción del primer medio por el seno del ángulo de incidencia es igual al producto del índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de refracción, esto es:

$$n_1 \cdot \text{sen } \varphi_1 = n_2 \cdot \text{sen } \varphi_2 \quad (1)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de ambos materiales, φ_1 es el ángulo de incidencia y φ_2 es el ángulo de refracción.

En la refracción se cumplen las leyes deducidas por Huygens que rigen todo el movimiento ondulatorio:

- El rayo incidente, el reflejado y el refractado se encuentran contenidos en el mismo plano.
- Los ángulos de incidencia y reflexión son iguales.

La velocidad de la luz depende del medio por el que viaje, por lo que es más lento cuanto más denso sea el material y viceversa. Por ello, cuando la luz pasa de un medio menos denso (aire) a otro más denso (cristal), el rayo de luz es refractado acercándose a la normal y por tanto, el ángulo de refracción será más pequeño que el ángulo de incidencia.

Del mismo modo, si el rayo de luz pasa de un medio más denso a uno menos denso, será refractado alejándose de la normal y, por tanto, el ángulo de incidencia será menor que el de refracción.

A continuación, se procede a analizar la repercusión que produce el ángulo de incidencia sobre la superficie, al cambiar de medio. En la figura 2.2, se ilustra en primer caso, la refracción de un rayo al cambiar de un medio a otro.

La segunda representación, permite definir el concepto de ángulo crítico, el cual, es el ángulo de incidencia que genera que el rayo refractado sea tangente a la superficie de separación entre los dos medios (forma un ángulo de 90° con la normal a ambas superficies). Despejando en la fórmula (1), se obtiene el valor del ángulo crítico como:

$$\theta_c = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Si se aumenta el ángulo incidente por encima del valor del ángulo crítico, se obtiene el efecto de reflexión total interna, en el que los rayos no pasan al segundo medio sino que son reflejados en la superficie de separación. Además para que este efecto ocurra, el rayo de luz debe cambiar a un medio con menor índice de refracción. En la tercera representación de la figura 2.2 puede visualizarse un ejemplo de dicho caso.

La fibra óptica se basa en el guiado de luz mediante el efecto de la reflexión total interna. Este procedimiento se explicará posteriormente, en el apartado de fibra óptica.

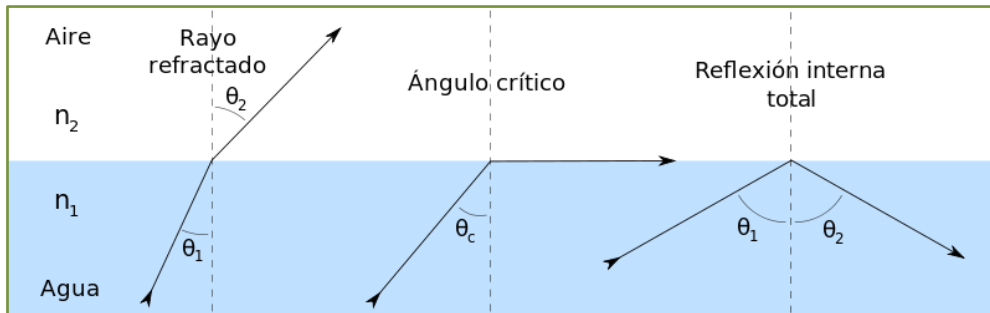


Figura 2.2 Importancia del ángulo de incidencia

2.2.2. Difracción

La difracción se observa cuando se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda. El caso más sencillo corresponde a la difracción Fraunhofer, en la que el obstáculo es una rendija estrecha y larga. También sucede cuando un grupo de ondas de tamaño finito se propaga; por ejemplo, por causa de la difracción, un haz angosto de ondas de luz de un láser debe finalmente divergir en un rayo más amplio a una cierta distancia del emisor. Se puede suponer que las ondas incidentes son normales al plano de la rendija, y que el observador está a una distancia grande en comparación con la anchura de la misma.

De acuerdo con el principio de Huygens, cuando la onda incide sobre una rendija todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas, denominadas ondas difractadas, por tanto, si la rejilla es muy reducida se puede suponer que un único punto actúa como fuente. Este fenómeno puede observarse en la figura 2.3 que se ilustra a continuación.

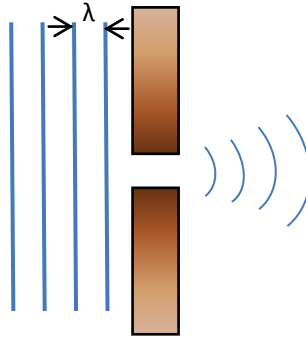


Figura 2.3 Difracción de las ondas al atravesar una rejilla.

La Difracción de Fresnel o también difracción del campo cercano es un patrón de difracción de una onda electromagnética obtenida muy cerca del objeto causante de la difracción (a menudo una fuente o apertura). Más precisamente, se puede definir como el fenómeno de difracción causado cuando el número de Fresnel es grande y, por tanto, no puede ser usada la aproximación Fraunhofer (difracción de rayos paralelos).

2.2.3. Dispersión de la luz

El fenómeno de dispersión puede comprenderse apelando a la teoría corpuscular de la luz. Cuando un fotón encuentra una no-uniformidad en el medio es forzado a desviar su trayectoria. El cambio de dirección tiene cierta aleatoriedad que, a veces, es utilizada para caracterizar a los dispersores (en inglés *scatters*).

Si se considera a la luz como un fenómeno ondulatorio, puede verse como una onda incidiendo sobre una partícula dispersora. A priori, la radiación dispersada puede calcularse si se conocen los índices de refracción de los dos materiales y la forma del dispersor [10].

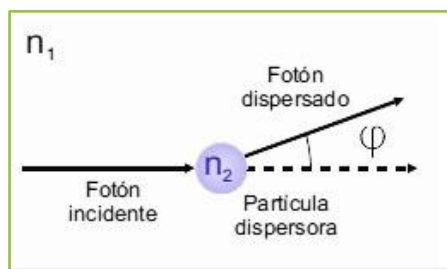


Figura 2.4 Ejemplo del fenómeno de dispersión

En la práctica, los fenómenos de dispersión simple se clasifican, dependiendo de la relación entre el tamaño del objeto dispersor y la longitud de onda, según la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad (3)$$

Donde πD_p es la circunferencia del difusor y λ la longitud de onda de la luz. Por tanto, estos fenómenos se agrupan en las siguientes categorías:

- **Dispersión geométrica ($\alpha \gg 1$):** se produce cuando el tamaño del dispersor es mucho mayor que la longitud de onda. Su comportamiento sigue las leyes de Snell y Fresnel.
- **Dispersión de Rayleigh ($\alpha \ll 1$):** en este caso el tamaño del dispersor es mucho menor que la longitud de onda. Es un proceso elástico, en el cual la radiación electromagnética (incluyendo la luz) es dispersada a través de un pequeño volumen esférico de índice de refracción variable, tal como una partícula, burbuja o gota.

La teoría de Rayleigh es válida hasta una relación de 1/10. Para diámetros mayores, se apela a la solución de Mie. Un proceso relacionado es la dispersión de Raman, la cual, a diferencia de la de Rayleigh, es inelástica. Generalmente, esta dispersión es mucho más débil que la anterior.

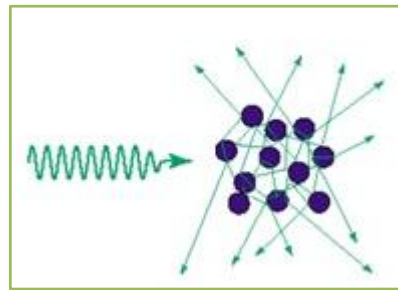


Figura 2.5 Ejemplo dispersión de Rayleigh

- **Dispersión de Mie ($\alpha \approx 1$):** se produce cuando el tamaño del dispersor es del orden de la longitud de onda. Mie describe la dispersión mediante pequeños objetos esféricos, que pueden absorber parte de la energía del fotón y reflejar el resto. Esto provoca que dichos fotones no sigan un camino recto y, en el caso de la fibra óptica, puedan escapar del núcleo a la cubierta o a otro medio externo.

Por otro lado, ocurre dispersión múltiple cuando un fotón que recorre un medio puede alterar varias veces su trayectoria.

Si se considera que el medio posee una distribución uniforme de dispersores idénticos, su formulación se puede aproximar a un fenómeno de dispersión simple, pero en un caso más general se dificulta notablemente su tratamiento y modelado. El estudio de patrones de speckle originados por este tipo de dispersión continúa siendo un tema abierto [12].

2.2.4. Absorción

Por último, la absorción es un proceso en el cual una partícula, ya sea átomo o molécula, puede extraer energía a un fotón. Una caída de nivel de alta energía a otro de baja energía es llamada decaimiento y está acompañado de la liberación de energía igual a la diferencia de energía de dos niveles.

$$\Delta E = h\nu \quad (4)$$

Esta liberación puede ocurrir sin radiación, liberando calor al medio o emitiendo un fotón. En general, hay tres tipos básicos de absorción: electrónica, vibracional y rotacional. El primero puede ocurrir en átomos y moléculas, mientras que los dos restantes suceden únicamente en moléculas.

2.2.5. Interferencia

El principio de superposición para ondas electromagnéticas implica que, por ejemplo, dos campos superpuestos u_1 y u_2 se suman para obtener un campo resultante $u_1 + u_2$. Este principio es la base de la interferencia [11].

Debido a la lenta respuesta de los detectores, el fenómeno de interferencia es también un tema que depende del tiempo y del espacio. Por tanto, el concepto de coherencia está íntimamente relacionado con la interferencia. Un gran grado de coherencia es obtenido de fuentes tipo laser, que además han sido extensamente utilizadas como fuentes de luz en interferometría.

La interferencia puede ocurrir cuando dos o más ondas se superponen con otra espacialmente. Asumiendo las dos ondas superpuestas, descritas por:

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \quad (5)$$

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \quad (6)$$

La teoría electromagnética indica que el campo resultante es simplemente la suma de ambas ondas.

$$u = u_1 + u_2 \quad (7)$$

Se puede definir la intensidad como:

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (8)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\phi \quad (9)$$

Dónde:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (10)$$

Como se puede observar, la intensidad resultante no es únicamente la suma de las intensidades $I_1 + I_2$ de las dos ondas. Por lo tanto, el término que origina la interferencia es $2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\phi$.

Analizando la diferencia de fase se puede demostrar que cuando su valor es:

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

Se obtiene que $\cos \Delta\phi = -1$ y por lo tanto, se alcanza el valor mínimo de la expresión, ya que las dos ondas están en contrafase. Esto significa que la interferencia es destructiva.

Sin embargo, cuando la diferencia de fase alcanza estos valores:

$$\Delta\phi = 2n\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

Se obtiene que $\cos \Delta\phi = 1$ y por lo tanto se alcanza el valor máximo. En este caso, las dos ondas están en fase, y la interferencia es constructiva.

Por otra parte, si las dos ondas tienen la misma amplitud, la intensidad resultante se puede definir como:

$$I = 2I_0(1 + \cos\Delta\phi) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (13)$$

Por lo tanto, se puede comprobar que la intensidad puede variar entre 0 y $4I_0$.

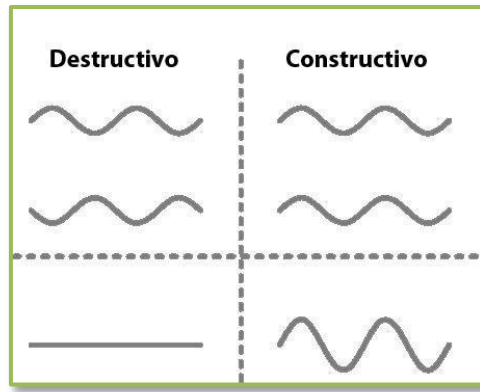


Figura 2.6 Efecto de interferencia

La figura 2.6 representa los tipos de interferencia descritos. La interferencia destructiva cuando las ondas están en contrafase y la interferencia constructiva cuando ambas ondas están en fase y como resultado se crea una onda de mayor amplitud.

Como resumen, ésta demostración se puede trasladar a los rayos de luz que viajan por la fibra óptica, y puesto que ésta es un medio dispersivo, dichos rayos presentan diferencias de fase que producirán interferencias a lo largo de la fibra. Debido a estas interferencias se obtiene al final de la fibra un moteado de puntos claros, donde la interferencia es constructiva y puntos oscuros donde la interferencia es destructiva. Este moteado es extensamente conocido como patrón de speckle, el cual, se analizará más detalladamente en los siguientes apartados.

2.2.6. Coherencia

La coherencia es una propiedad de las ondas electromagnéticas para estar en fase tanto en el tiempo, conocida como coherencia temporal, como en el espacio, denominada coherencia espacial [11].

La luz incoherente produce ondas con distintas fases y frecuencias (no es monocromática) y en varias direcciones que provoca que dichas ondas se sumen o se resten, según el concepto de interferencia anteriormente descrito. En la figura (a) puede observarse tal ejemplo. Sin embargo, en la luz coherente todas las ondas son emitidas con la misma longitud de onda y la misma orientación.

Por dichas causas, se trata de luz monocromática y con muy poca divergencia del haz. La fuente de luz coherente más conocida es el láser.

En la figura 2.7, la primera fuente puede ser una bombilla o un diodo LED, en cambio, la segunda fuente se corresponde con una fuente tipo LASER.

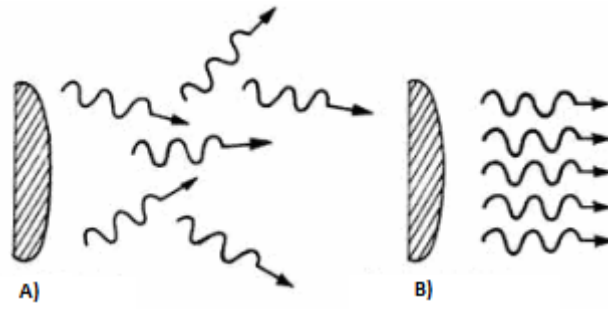


Figura 2.7 Tipos de fuente de luz. A) Fuente Incoherente. B) Fuente Coherente.

Por otra parte, la detección de luz, por ejemplo, la intensidad media, es un proceso de promediado tanto en el espacio como en el tiempo. En el desarrollo de la ecuación de la intensidad anterior, no se ha promediado porque se asume que la diferencia de fase va a ser constante en el tiempo. Esto significa que asumimos u_1 y u_2 tienen la misma frecuencia única. Idealmente, una onda de luz con una única frecuencia debe tener una longitud infinita. Pero, matemáticamente, incluso una onda sinusoidal pura de longitud finita va a tener una expansión frecuencial según el teorema de Fourier.

En la siguiente figura se han dibujado dos trenes de onda sucesivos de dos ondas iguales. Dichos trenes tienen la misma amplitud y longitud L_c con una diferencia de fase aleatoria.

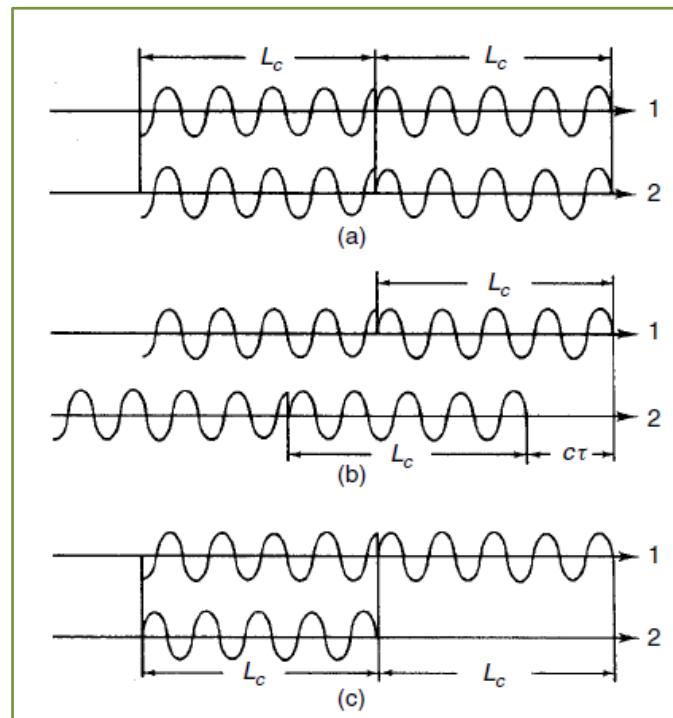


Figura 2.8 Trenes de dos ondas iguales

En el primer caso (a), se muestra la situación cuando las dos ondas han viajado la misma distancia. Aunque la fase de la onda original fluctúa aleatoriamente, la diferencia de fase entre las dos ondas permanece constante en el tiempo.

En el tercer caso (c), se detalla la situación en que la onda 2 ha viajado por un camino más largo que la onda 1. El comienzo del tren de ondas de la onda 2 coincide con el final del correspondiente al tren de ondas de la onda 1. Ahora la diferencia de fase fluctúa aleatoriamente según pasan los sucesivos trenes de onda. Como resultado el $\cos \Delta\phi$ varía aleatoriamente entre $+1$ y -1 .

El segundo caso (b), ilustra una situación intermedia donde la onda 2 ha viajado un camino L mayor que la onda 1, donde $0 < L < L_c$. La diferencia de fase varía aleatoriamente en un tiempo proporcional al periodo $\tau = L/c$ y permanece constante para un tiempo proporcional a $\tau_c - \tau$, donde $\tau_c = L_c/c$. En este caso, todavía se puede observar un patrón de interferencia pero con un contraste reducido.

Para contabilizar la pérdida de contraste se escribe la ecuación de la intensidad:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)| \cos \Delta\phi \quad (14)$$

Donde $|\gamma(\tau)|$ es el valor absoluto de $\gamma(\tau)$ que es la función de coherencia. Dicha función no se detalla más profundamente, puesto que no es objeto de estudio en este trabajo, pero puede ampliarse dicha información en [12].

Se puede definir el contraste o visibilidad como:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (15)$$

En la figura 2.9, se ilustra la función de contraste. Para ello, se representa la variación del contraste en función de los valores de intensidad máxima y mínima.

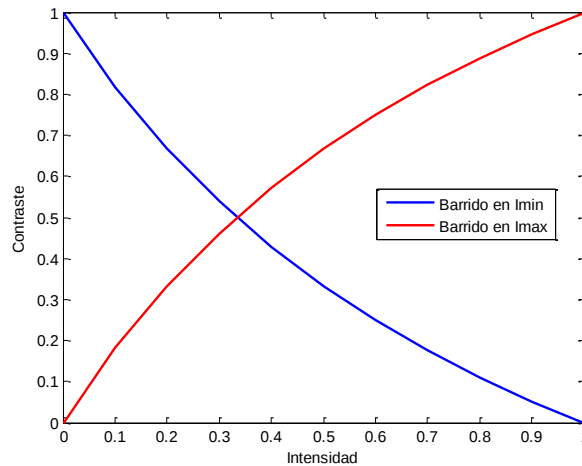


Figura 2.9 Función contraste

Además, se expresa la intensidad máxima y mínima, suponiendo que el $\cos \Delta\phi$ varía entre $+1$ y -1 , según las siguientes ecuaciones:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\pi)| \quad (16)$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\pi)| \quad (17)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior, se tiene:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\pi)|}{I_1 + I_2} \quad (18)$$

Si se igualan las intensidades $I_1 = I_2$, la ecuación resultante es:

$$V = |\gamma(\pi)| \quad (19)$$

En este caso, $|\gamma(\pi)|$ es exactamente igual a la visibilidad. Puesto que $\gamma(\pi)$ es la función que mide el grado de coherencia que existe, se pueden definir los valores entre los que oscila dicha función.

$$|\gamma(0)| = 1 \quad (20)$$

$$|\gamma(\tau_c)| = 0 \quad (21)$$

$$0 \leq |\gamma(\tau)| \leq 1 \quad (22)$$

Donde las ecuaciones representan los dos casos límite de una coherencia completa y el caso de incoherencia respectivamente. La desigualdad (22) representa el caso de coherencia parcial.

2.2.6.1. Longitud de Coherencia

La longitud de coherencia es la máxima diferencia de camino recorrido por las ondas que todavía permite tener una coherencia temporal específica. Cuanto más monocromática es la onda, mayor es la longitud de coherencia. En el límite, cuando una onda plana es perfectamente monocromática, su longitud de coherencia será infinita.

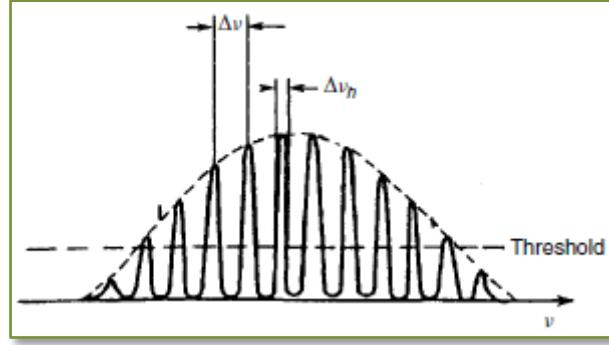


Figura 2.10 Distribución espectral del láser

Aunque la luz de un láser tiene una longitud de onda bien definida, sigue teniendo una cierta anchura espectral. Se puede definir la diferencia frecuencial como:

$$\Delta\nu = c/2L \quad (23)$$

Donde c es la velocidad de la luz y L es la distancia entre los espejos del láser. En la siguiente figura, se ilustra la distribución espectral de la luz de un láser multimodo de He-Ne, donde se aprecia que no es del todo monocromático.

Suponiendo que se tiene dos ondas u_1 y u_2 con las siguientes frecuencias:

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} \quad (24)$$

$$\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \nu_1 + \Delta\nu \quad (25)$$

Puesto que u_1 interfiere únicamente consigo misma, pero no con u_2 , y viceversa, la intensidad total se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$I(l) = 2I \left(1 + \cos \frac{2\pi\nu_1 l}{c} \right) + 2I \left(1 + \cos \frac{2\pi\nu_2 l}{c} \right) \quad (26)$$

Donde l es la diferencia de distancia entre ambos caminos. Si asumimos que u_1 y u_2 tienen la misma intensidad, se puede reescribir la ecuación anterior como:

$$I(l) = 4I \left[1 + \cos \frac{2\pi(\nu_1 - \nu_2)l}{2c} \cos \frac{2\pi(\nu_1 + \nu_2)l}{2c} \right] \quad (27)$$

Se puede observar que el término de interferencia es el mismo que el obtenido con una fuente de luz cuya frecuencia media es $(\nu_1 + \nu_2)/2$, pero multiplicado o modulado por el factor:

$$\cos \frac{2\pi\Delta\nu l}{2c} \quad (28)$$

Lo que significa que cada tiempo,

$$\frac{\Delta\nu l}{2c} = \frac{n}{2} \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (29)$$

$$l = n \frac{c}{\Delta\nu} = n2L \quad (30)$$

En este caso, el contraste o visibilidad del patrón de interferencia será un máximo. La visibilidad y, por tanto, el grado temporal de coherencia es dado por:

$$|\gamma(\tau)| = \left| \cos \frac{\pi\Delta\nu l}{c} \right| = \left| \cos \frac{\pi l}{2L} \right| \quad (31)$$

La diferencia de longitud correspondiente al primer mínimo en la función de visibilidad, es la llamada longitud de coherencia.

Esto se puede observar en la figura 2.11, en donde se puede concluir que al utilizar un láser en interferometría, la diferencia de distancia de los caminos debería estar próxima a cero o un número dos veces la longitud del resonador.

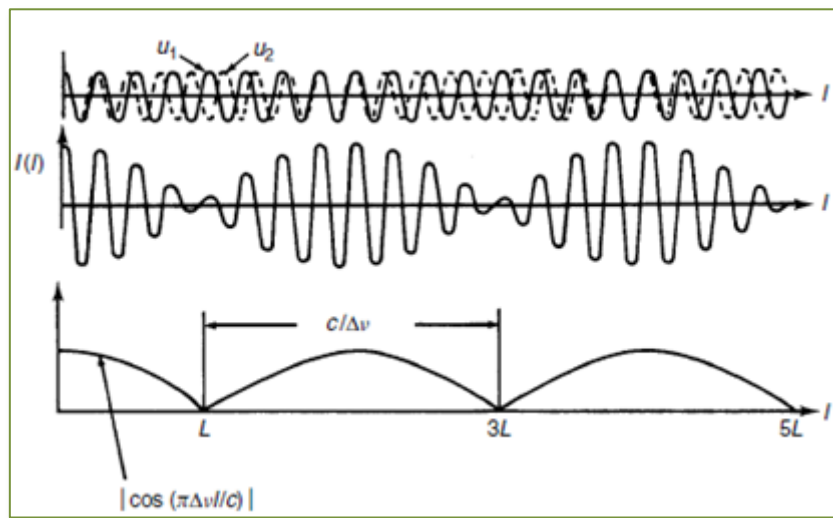


Figura 2.11 (a) Amplitudes u_1 y u_2 del campo. (b) Distribución de la intensidad. (c) Grado de coherencia temporal.

Debido a que la longitud de coherencia se obtiene cuando la función de visibilidad o contraste es nula y que coincide, en este caso particular, con la función de grado de coherencia que se definió en el apartado anterior, se puede obtener el tiempo de coherencia como el instante temporal en el que $|\gamma(\tau)| = 0$.

Por lo tanto, se puede definir el tiempo de coherencia como:

$$\tau = \tau_c = \frac{L_c}{c} = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (32)$$

Donde $\Delta\nu$ es la diferencia de frecuencia entre las dos ondas u_1 y u_2 . Se puede observar que la relación se puede aplicar a cualquier fuente de luz con un ancho de distribución de frecuencia $\Delta\nu$. Por lo tanto, se define L_c como la longitud de coherencia y τ_c como el tiempo de coherencia.

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (33)$$

En relación con lo descrito anteriormente, las fuentes presentan un ancho espectral finito que emitirá trenes de ondas de longitud finita. Esto es verificado mediante la siguiente relación:

$$\Delta\nu = c \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda^2} \quad (34)$$

Por lo que finalmente se puede expresar la longitud de coherencia de una fuente mediante la longitud de onda que emite y la anchura espectral que presenta.

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda_c} \quad (35)$$

El rango del espectro visible abarca desde $4,3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ hasta $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$, lo cual equivale a una anchura espectral de $\Delta\nu = 3,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$. De la ecuación (33) se puede calcular que el tiempo de coherencia para la luz blanca está entorno a $3,1 \times 10^{-15} \text{ s}$, que se corresponde con una longitud de coherencia de $1 \mu\text{m}$.

Si se utiliza una fuente de luz coherente como es el láser, se puede llegar a obtener longitudes de coherencia de varios cientos de metros. El desarrollo de este proyecto, aprovecha esta propiedad de las fuentes tipo láser para provocar interferencias de ondas dentro de la fibra producidas por partículas dispersoras, lo cual genera a la salida un patrón de speckle aleatorio.

2.3. Fibra óptica

2.3.1. Introducción

La Historia de la comunicación por la fibra óptica es relativamente corta. En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra y poco después se empezó a fabricar y emplear en mayores cantidades.

En 1959, como derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser y fue el impulsor para que en 1966 se tomase la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación.

El problema técnico que se había de resolver para el avance de la fibra óptica residía en las fibras mismas, que absorbían la luz que dificultaba el proceso. Desde entonces, se ha ido mejorando la calidad tanto de las fibras ópticas como de las fuentes de luz, permitiendo crear sistemas de comunicación más rápidos y seguros.

2.3.2. Características

La fibra óptica es un medio de transmisión que permite el guiado de rayos luminosos desde un punto inicial a otro punto final.

Generalmente, consiste en dos regiones concéntricas. La región interna es un filamento transparente llamado núcleo, cuyo diámetro $2a$ suele estar comprendido entre 8 y $600\ \mu\text{m}$ dependiendo del tipo de fibra óptica, y su índice de refracción n_1 es superior a la región externa llamada cubierta, con un diámetro $2b$ y un índice de refracción n_2 , tal como se puede observar en la figura 2.12 mostrada a continuación.

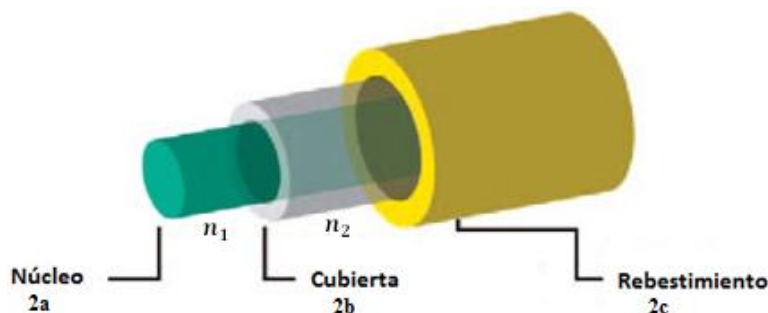


Figura 2.12 Componentes principales que integran la fibra óptica

Se suele fabricar con fibra de vidrio o plástico según sus aplicaciones. Cabe destacar que para que la luz se pueda transmitir a lo largo de la fibra, se debe cumplir el fenómeno de reflexión total interna, descrito en la sección anterior.

En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, de tal forma que prácticamente avanza por su centro. De este modo, se pueden guiar las señales luminosas con pocas pérdidas por largas distancias.

2.3.2.1. Índice de Refracción

El índice de refracción de un medio se define como la relación entre la velocidad de la onda luminosa en el vacío (c) y la velocidad de la onda luminosa propagada en el medio (v).

$$n = \frac{c}{v} \quad (36)$$

El índice de refracción en el vacío es $n_{vacio} = 1$, mientras que en el aire es $n_{aire} = 1.003$ pero se suele aproximar a $n_{aire} = 1$. En el vidrio el índice de refracción es $n_{vidrio} = 1.5$ por lo que al ser un medio denso, la velocidad de propagación de la luz en este medio disminuye.

Existen numerosos perfiles de índice pero generalmente se trabaja con dos. El perfil de salto de índice, como el ilustrado en la figura 2.13 (a) o de índice gradual como las figuras mostradas en 2.13 (b) y (c).

Para el caso de salto de índice, solo se tienen dos valores, que se corresponden al índice de refracción del núcleo y al índice de refracción de la cubierta. Sin embargo, para el perfil de gradiente de índice, el núcleo presenta un índice de refracción que varía en función de la distancia al centro (r).

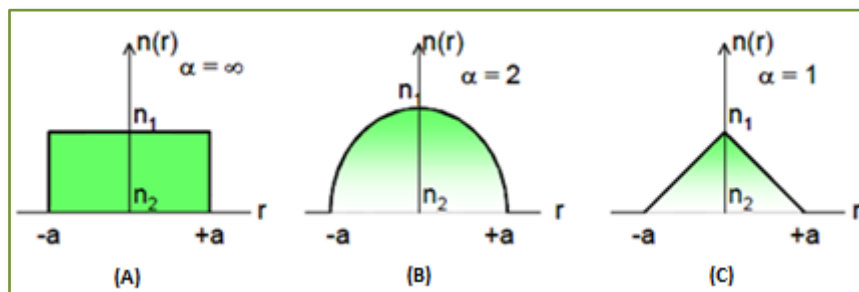


Figura 2.13 Perfiles de índice. (A) Salto de índice. (B) Índice gradual parabólico. (C) Índice gradual triangular.

Por tanto, el índice no es un valor constante y se utiliza la siguiente expresión:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \quad (37)$$

Donde α es un valor que depende del tipo de gradiente de índice utilizado, tal como se puede observar en la figura anterior.

Las fibras con perfil de índice gradual, permiten que los rayos que viajan por el núcleo vayan sufriendo pequeñas refracciones que reducen el ángulo de incidencia al llegar a la superficie límite con la cubierta. Su principal ventaja reside en que reduce considerablemente la dispersión en comparación con las fibras de salto de índice. Por lo tanto, el índice de refracción es un factor clave en el proceso de diseño y fabricación de fibra óptica, pues determinará varios aspectos, entre ellos la apertura numérica.

2.3.2.2. Apertura Numérica

La apertura numérica denota el ángulo máximo de incidencia, con el cual toda la luz incidente es propagada por el interior de la fibra sin que se produzca refracción, por lo que los rayos son únicamente reflejados. Es lo que se denomina el fenómeno de la reflexión total, que constituye el principio fundamental para entender el comportamiento de la fibra como una guía de ondas.

De este modo, la apertura numérica se define de la siguiente manera:

$$AN = n_0 \sin(\theta_{cri}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (38)$$

Donde Δ es la diferencia relativa de índices.

La apertura numérica es función únicamente de los índices de refracción que posee la fibra siendo n_1 el correspondiente al núcleo y n_2 el correspondiente a la cubierta. Por tanto, los rayos que lleguen con un ángulo de incidencia superior al ángulo crítico (θ_{cri}) son refractados hacia la cubierta y no se produce la reflexión total.

De esta idea surge el concepto de cono de aceptación que permite definir la región del espacio donde la luz inyectada será propagada a través de la fibra sin apenas pérdidas, ya que incide con un ángulo menor al ángulo crítico, como se ilustra en la figura 2.14 siguiente.

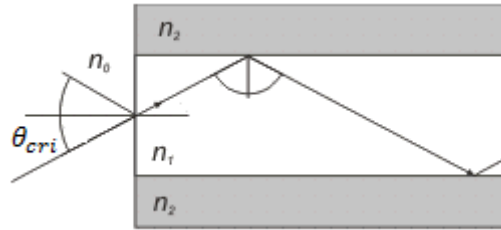


Figura 2.14 Representación del ángulo crítico

2.3.3. Propiedades

Actualmente, la gran demanda de fibras ópticas y sus implementaciones en todo tipo de aplicaciones que se explicarán más adelante, ha dado lugar a un gran catálogo compuesto por multitud de fibras ópticas que se pueden clasificar de muchas maneras, según los aspectos que se aborden.

- Material de fabricación
- Reducir la atenuación
- Mejorar la dispersión
- Tipo de fuente de luz
- Aplicaciones concretas

Así, por ejemplo, según el material utilizado en la fabricación, destacan tanto las fibras de vidrio como las fibras de plástico. Cada cual presenta características distintas, las fibras plásticas conocidas como *POF* (del inglés *Plastic Optical Fiber*) presentan tamaños de núcleos mucho mayores que las fibras de vidrio, lo que provoca que se propague un número muy elevado de modos. Además, presentan pérdidas de atenuación mucho más elevadas, en torno a 100 dB/km frente a 1 dB/km en las fibras de vidrio. Por esta razón, son utilizadas mayormente en aplicaciones de distancias cortas, donde la atenuación no es muy grande.

Dentro de las fibras de vidrio, según las características que presente la fibra, se propagan más o menos modos dando lugar a fibras monomodo o multimodo. En general, el número de modos depende del radio del núcleo, de los índices de refracción, y de la longitud de onda de la luz que se propaga. En el siguiente capítulo se aborda la deducción del número de modos de una fibra óptica. Generalmente, las fibras monomodo presentan un diámetro de núcleo muy pequeño inferior a $10 \mu\text{m}$ y su principal ventaja es que al solo propagarse un modo, presentan muy poca dispersión frente a las fibras multimodo.

Por otro lado, se pueden clasificar las fibras según el perfil de índice de refracción que tengan ya que puede haber perfiles simples, como el de salto de índice o de gradiente de índice, o muchos más complejos con geometrías muy diversas.

Respecto a la atenuación, son varios los mecanismos de degradación que contribuyen a la pérdida de energía. Unos son de carácter intrínsecos a la fibra, como la composición del vidrio, y otros de carácter extrínsecos causados por impurezas, geometría de la fibra, etc. Esto conlleva a definir unas pérdidas de atenuación a lo largo de la fibra que se suelen expresar en dB/km . Típicamente muchas de las impurezas que producían estas pérdidas se han reducido notablemente pero no eliminado por completo.

La atenuación de la fibra puede ser calculada como la relación de la potencia luminosa a la entrada y a la salida de la fibra, todo ello, por unidad de longitud, y para una determina longitud de onda. La siguiente ecuación refleja lo anteriormente mencionado.

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) \quad (39)$$

Por otra parte, estas pérdidas se suelen representar en una gráfica en función de la longitud de onda como la que se ilustra en la figura 2.15, y que permite enumerar tres ventanas de mínima atenuación.

Según la longitud de onda en que emita cada fuente de luz, se presenta una atenuación distinta para cada una de ellas. Por tanto, no es lo mismo utilizar una fuente de luz que emite en primera ventana que una fuente de luz emisora en tercera ventana.

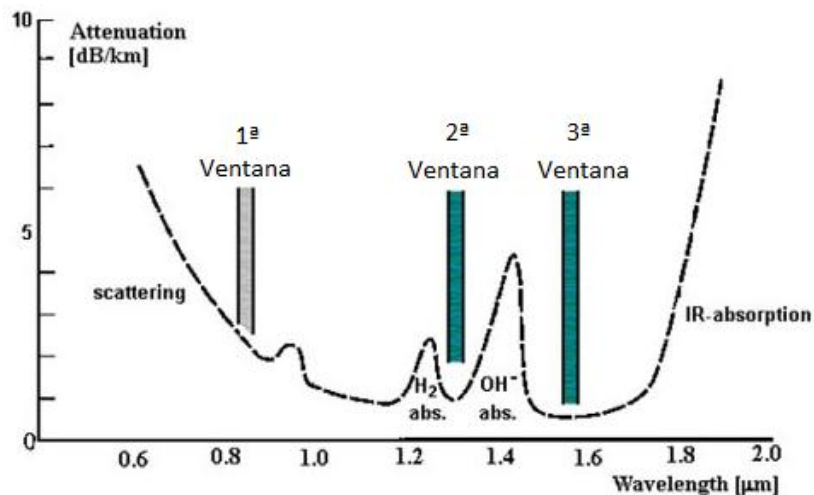


Figura 2.15 Representación de las tres ventanas de emisión

Atendiendo a criterios de dispersión se han desarrollado diversos tipos de fibra para eliminar o reducir los efectos que produce.

La dispersión es un fenómeno de esparcimiento o ensanchamiento de los pulsos que se propagan por la fibra. Existen varios tipos de dispersión, las más importantes son la dispersión cromática, debido a que las fuentes no son monocromáticas y cada longitud de onda viaja a través de la fibra a una velocidad distinta; la dispersión modal debida a que los tiempos de propagación de cada modo son distintos; y en menor en efecto también existe la dispersión debida al modo de polarización.

Para reducir la dispersión se pueden emplear fibras monomodo, ya que al propagarse solo un modo no se produce dispersión modal. Otra opción, consiste en utilizar fibras de índice gradual como se puede comprobar su efecto en la figura 2.16.

Como se puede observar en la figura 2.16, la fibra con gradiente de índice permite variar la velocidad de propagación de los modos para que los rayos lleguen en un determinado instante temporal, reduciendo así, considerablemente la dispersión.

Actualmente, se han desarrollado diversas fibras que permiten reducir la dispersión desplazando el punto de mínima dispersión en el espectro.

- Fibra SSMF (*Estándar Single-Mode Fiber*): fibra monomodo estándar.
- Fibra DSF (*Dispersion Shifted Fiber*): fibra con dispersión desplazada.
- Fibra NZDSF (*Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*): fibra de dispersión desplazada no nula positiva o negativa.

Como no es objetivo específico de este proyecto, no se profundiza en el tema y solo se citan como mera referencia.

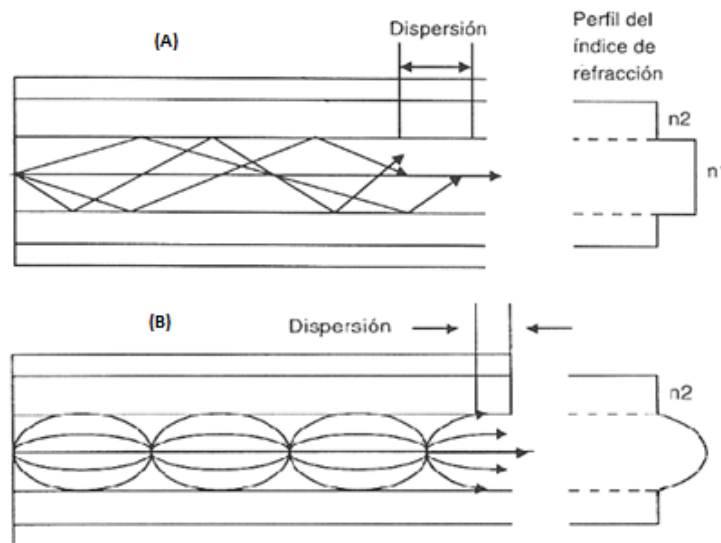


Figura 2.16 Propagación de la luz. (A) Fibra de salto de índice. (B) Fibra de índice gradual.

2.4. Características del fenómeno speckle

2.4.1. Generación de speckle

La propagación de la luz en un material donde existen fenómenos de dispersión y absorción se puede clasificar como coherente o incoherente. La coherencia se refiere a la habilidad del campo óptico para mantener una fase definida en tiempo y espacio de tal manera que permita exhibir efectos de interferencia estables [12]. El patrón de speckle es un ejemplo de este tipo de interferencia. Para que exista coherencia es necesario que la fuente de iluminación sea coherente y que esta coherencia se mantenga durante la propagación de la luz.

Por consiguiente, el patrón de speckle puede considerarse como un patrón formado por la interferencia de múltiples ondas con fases individuales y aleatorias. Visualmente, consiste en un patrón formado por puntos oscuros y puntos brillantes distribuidos aleatoriamente en el espacio, tal como se puede observar en la figura 2.17.

La interferometría speckle, en términos de ópticos, consiste en el análisis de patrones de intensidad producidos por la interferencia mutua entre frentes de onda coherentes que son sujetos a diferencias de fase o fluctuaciones de intensidad. Estos patrones constituyen una valiosa fuente de información sobre la superficie iluminada.

Distintos ejemplos de patrones speckle se presentan cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz láser o cuando la imagen de una estrella distante es observada a través de la atmósfera. Además, con el uso de estos sistemas es posible analizar, en un sólo punto, deformaciones o desplazamientos en la superficie de una muestra tanto en la dirección axial (modo *out-plane*) como en la dirección tangencial (modo *in-plane*).

Sin embargo, el desarrollo de este proyecto se empleará para analizar perturbaciones sufridas a lo largo de la fibra óptica que generará un patrón de speckle que fluctúe según las perturbaciones realizadas. Estas variaciones tienen un comportamiento aleatorio y, por ello, requieren un análisis estadístico.

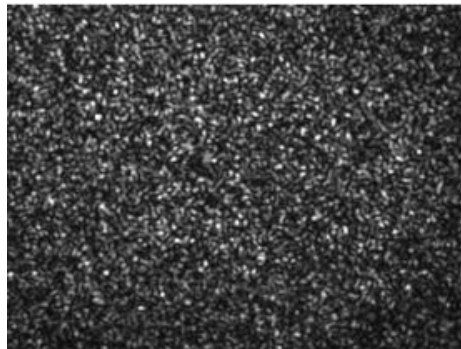


Figura 2.17 Ejemplo de patrón de speckle

2.4.2. Tipos de speckle

En la literatura se clasifican los patrones de speckle según el método de observación. De esta manera, si se observa el speckle generado desde una cierta distancia y sin utilizar ningún tipo de lente sobre el sensor receptor o cámara CCD, se llama “*speckle de campo lejano*” o “*speckle objetivo*”, un ejemplo se ilustra en la figura 2.18 (a). La medida de estos speckles es función de la longitud de onda de la luz (λ), el ancho del haz generado (L) y la distancia entre el patrón y el sistema de captura (z). De tal manera que el tamaño medio del speckle puede aproximarse, según [4] por:

$$D = \lambda z / L \quad (40)$$

Por otro lado, el patrón observado directamente sobre una superficie iluminada o una porción de ella, mediante un sistema o lentes, se denomina “*speckle imagen*” o “*speckle subjetivo*”. La figura 2.18 (b) ilustra una demostración de este tipo. Se llama así debido a que la estructura de los patrones depende del sistema de observación, ya que si la apertura de la lente cambia, también lo hace la medida de los speckles.

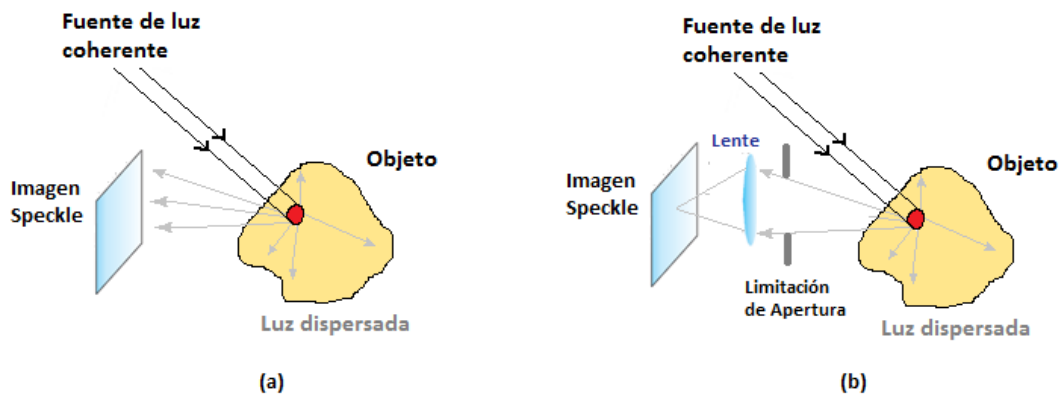


Figura 2.18 Tipos de speckle. (a) Speckle Objetivo. (b) Speckle subjetivo.

2.4.3. Análisis estadístico

El speckle es un fenómeno aleatorio, y como tal, solo puede ser descrito estadísticamente. Goodman [13] realizó un estudio detallado del comportamiento estadístico del fenómeno, el cual fue sustentado por mediciones experimentales realizadas por Dainty [4].

La amplitud compleja de un punto en un patrón de speckle puede escribirse de la siguiente manera:

$$u = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N u_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N U_k e^{i\phi_k} \quad (41)$$

En donde, pueden asumir las siguientes condiciones:

- La amplitud y fase de cada componente son estadísticamente independientes y también independientes de las amplitudes y fases del resto de componentes.
- Las fases ϕ_k están uniformemente distribuidas sobre todos los valores entre $\pm\pi$ y la amplitud compleja responde a estadísticas Gaussianas.

Por tanto, la función densidad de probabilidad $P_I(I)$ para la intensidad en un patrón de speckle viene dado por la siguiente expresión.

$$P_I(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{I}{\langle I \rangle}} \quad (42)$$

Donde $\langle I \rangle$ es la intensidad media. Si se representa la intensidad de speckle, se puede comprobar que obedece a una función exponencial negativa, tal y como se puede observar en la figura 2.19.

Cabe destacar que la intensidad con mayor probabilidad es para el caso en que su valor es nulo, lo cual representa un punto de oscuridad. Para valores más altos la probabilidad cae rápidamente.

Las estadísticas para analizar el patrón de speckle se pueden dividir en estadísticas de primer y segundo orden.

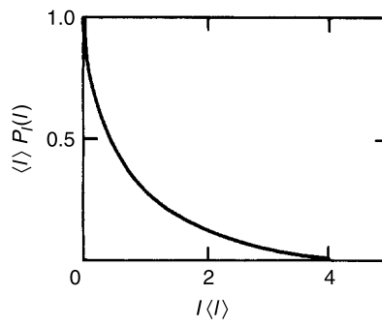


Figura 2.19 Densidad de probabilidad de la intensidad

Las estadísticas de primer orden describen las propiedades puntuales de un patrón speckle, sin atender a la relación entre las intensidades en diferentes puntos. Lo cual lleva a definir una función densidad de probabilidad de intensidad de tipo exponencial negativa descrita en la ecuación (42).

Una de las propiedades de esta distribución es que la desviación estándar de intensidad es igual a la intensidad media:

$$\sigma_s = \langle I \rangle \quad (43)$$

En la práctica, los patrones de speckle a menudo tienen una desviación estándar que es menor que la intensidad media, y esto se refleja como una reducción en el contraste espacial del patrón. Por ello, se puede definir el contraste espacial como el cociente entre la desviación estándar de la intensidad y su valor medio.

$$C = \frac{\sigma_s}{\langle I \rangle} \quad (44)$$

Así, para el caso de tener un speckle totalmente desarrollado, se obtiene un contraste igual a la unidad.

Las estadísticas de segundo orden de un patrón de speckle describen a qué velocidad varía la intensidad de punto a punto en el patrón, lo cual brinda una indicación de la medida del speckle. Las funciones más comunes usadas para representar la estadística mencionada son la función autocorrelación de la intensidad, su transformada de Fourier, y la matriz de coocurrencia de niveles de gris.

2.4.4. Speckle en fibras multimodo

Las fibras multimodo soportan multitud de modos de propagación con diferentes velocidades de fase. Desde un punto de vista de óptica geométrica, que tiene buena precisión para fibras que son altamente multimodo, se explica que los rayos se propagan a través de la fibra con diferentes ángulos respecto al eje de la fibra, por lo cual, no todos los rayos recorren la misma distancia. A consecuencia de esto, dichos rayos sufren distintos retardos de fase a medida que pasan por la guía.

Mediante el análisis electromagnético se demuestra cómo la fibra óptica presenta muchos y diferentes posibles modos de propagación, cada uno con diferentes velocidades de fase. En cualquiera de los dos planteamientos, la luz a la salida de la guía consiste en la suma de multitud de contribuciones individuales de dicho campo.

Si los retardos de fase varían más de 2π radianes, y si la fuente es suficientemente coherente, entonces se producirán interferencias en los rayos. Dicho efecto se observa a la salida de la fibra mediante la distribución de la intensidad.

En la figura 2.20, se ilustra la luz emergente a la salida de la fibra óptica multimodo, donde se aprecia la distribución de la intensidad que genera el patrón de speckle.

El número de modos que soporta una fibra multimodo de salto de índice está dado en función de la frecuencia normalizada V :

$$V \approx \frac{2\pi}{\lambda} (AN)a \quad (45)$$

Donde a es el radio del núcleo de la fibra, λ es la longitud de onda de la luz y AN es la apertura numérica, que también se puede expresar como:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (46)$$

Donde Δ es la diferencia relativa de índices.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (47)$$

Siendo n_1 el índice de refracción del núcleo, y n_2 el índice de refracción de la cubierta. De este modo, sustituyendo la ecuación (45) en la ecuación (44) se puede asumir la siguiente aproximación:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{2\Delta} \quad (48)$$

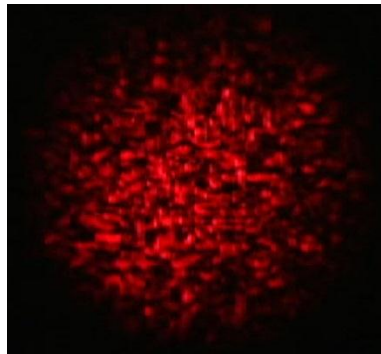


Figura 2.20 Intensidad del speckle obtenido en fibra multimodo.

Para frecuencias normalizadas altas, que es nuestro caso, se calcula el número de modos en la fibra mediante las siguientes ecuaciones:

- Fibra de salto de índice:

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad (49)$$

- Fibra de salto gradual:

$$M \approx \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \frac{V^2}{2} \quad (50)$$

Siempre que la energía en cada modo es aproximadamente la misma, el número de grados de libertad es M y la media de número de manchas que aparecen al final de la fibra en el patrón de speckle, se puede aproximar por M .

2.4.5. Ruido Modal

En 1978, Epworth [11] reportó una nueva fuente de ruido en los sistemas de fibra multimodo, que lo llamó “ruido modal”. Este tipo de ruido surge de las fluctuaciones del speckle cuando pasa por una transformación que restringe parte de la luz que se transmite. La restricción puede ser o bien una limitación de la zona de transporte de luz del núcleo a causa de fenómenos medioambientales, como la temperatura, o una restricción de los modos en que se propaga la luz debido a pérdidas o microcurvaturas.

Cuanto mayor es la longitud de coherencia de la fuente de luz, mayor es el ruido modal, ya que hay un mayor número de interferencias en la longitud de la fibra multimodo.

No se debe confundir el ruido modal con el ruido de partición, que es causado por cambios en la longitud de onda de la fuente debidos a variaciones de la constante dieléctrica por la presencia de electrones que maneja el láser.

Si la luz coherente es insertada dentro de una fibra multimodo, y si un detector al final de la fibra integra toda la luz que emerge del núcleo, entonces los efectos de radiación y de luz que se escapa por la cubierta debido a cambios medioambientales no son detectados al medir la potencia total.

2.4.6. Metrología Speckle

La metrología speckle se basa en técnicas que permiten realizar mediciones sin interferir en la medida por el contacto físico entre el aparato de medida y la muestra. Se trata de una técnica de no contacto, únicamente analizando los patrones de speckle generados.

Los desplazamientos o deformaciones producidos en el sistema de medida conllevan a generarse alteraciones en el patrón de speckle que se puede emplear para el desarrollo de técnicas de detección y cuantificación de dichas perturbaciones.

Éstas técnicas han dado lugar a la metrología speckle dentro de las técnicas de metrología óptica. En interferometría speckle se pueden destacar las siguientes técnicas que han sido implementadas desde que se empezó con su estudio.

- Interferometría electrónica (ESPI)
- Interferometría digital (SSI)
- Interferometría de superficies rugosas (ROSI)
- Interferometría doppler (DSI)
- Interferometría de cambio de fase (PSSI)
- Interferometría de speckle estelar
- Interferometría heterodina de speckle
- Interferometría de fotografía speckle

Generalmente, estas técnicas se pueden agrupar en tres grupos en función de las propiedades que presente el patrón de speckle. Existen las técnicas basadas en propiedades estadísticas del speckle, las técnicas basadas en la sensibilidad de la intensidad del patrón, y las basadas en la sensibilidad de la fase.

2.4.7. Técnicas de procesamiento de patrones de speckle

Cuando un patrón de speckle proviene de una superficie rugosa que experimenta movimientos o deformaciones, el speckle es dinámico. Algo similar ocurre cuando el patrón está generado por dispersores en movimiento, provocando fenómenos de *scattering* simple o múltiple. Como se estudió en la sección anterior, los dos métodos más comunes para obtener imágenes de patrones speckle son el speckle objetivo denominado de campo lejano, y el speckle subjetivo conocido como speckle imagen.

Existen numerosos métodos para analizar ambos tipos de patrones de speckle, ya que desde el principio de su estudio se han incrementado y mejorado las técnicas de medida y procesado de dichos patrones.

Pese a la gran cantidad de métodos desarrollados, todavía se emplean tres tipos básicos de análisis o una modificación de alguno de ellos.

2.4.7.1. Historia Temporal de Patrones de Speckle [THSP]

La forma más común de medir la movilidad de los speckles es analizando la historia temporal de los patrones speckle [1], que se construye agrupando líneas de imágenes sucesivas de cuadros speckle en una pseudo-imagen. Estos cuadros o líneas pueden obtenerse a través de una cámara de video o mediante un fotodetector.

Generalmente, para construir dicha pseudo-imagen se agrupa una columna i de cada patrón. Como consecuencia, si se tiene una secuencia de m imágenes de n píxeles de altura, la pseudo-imagen generada tendrá un tamaño de $(m \times n)$ píxeles. Por lo tanto, se puede medir la historia temporal en sentido horizontal. Para el procesado, se pueden emplear técnicas ya estudiadas como son:

- La función de autocorrelación
- La matriz de coocurrencia

2.4.7.2. Métodos para el Análisis del Contraste Speckle

Esta técnica fue desarrollada para la medición de flujo sanguíneo capilar [29]. Actualmente se conoce a esta técnica como *LASCA* por sus siglas en inglés “*Laser Speckle Contrast Analysis*”. Únicamente precisa de un láser para iluminar el área bajo estudio, una cámara CCD para capturar los patrones de speckle y un ordenador para procesar dichos patrones.

2.4.7.3. Métodos basados en Diferencias.

Se trata de una técnica sencilla para registrar cambios en los cuadros de speckle. Consiste en substraer dos cuadros y obtener su valor absoluto, lo cual registra los cambios de intensidad para cada pixel en dos instantes. Si se resta y se promedia una gran cantidad suficiente de muestras se tiene el método de “*diferencias promediadas*”.

2.4.7.4. Métodos basados en análisis de textura.

Permiten analizar las relaciones espaciales entre píxeles vecinos. El procesado de patrones de speckle mediante esta técnica posibilitar relacionar las variaciones que sufre el patrón de speckle con los descriptores de textura utilizados.

2.4.7.5. Conclusión sobre los tipos de métodos.

De entre todos los métodos destaca la matriz de coocurrencia de niveles de gris que permite calcular las relaciones de según orden de los patrones de speckle. Aunque en el desarrollo de este proyecto se utilizan diversas técnicas, el principal análisis se focaliza en el procesado mediante la matriz de coocurrencia.

3

CAPÍTULO

3. TÉCNICAS DE PROCESADO

3.1. Introducción

“La textura se define para nuestros propósitos como un atributo de un campo que no tiene componentes periódicas. Las relaciones de fase entre sus componentes no son obvias, ni debería el campo contener un gradiente obvio. Este intento de definición dirige la atención de observador a las propiedades globales de la imagen. Físicamente, los patrones no periódicos son generados por procesos estocásticos, en oposición a los procesos deterministas. Perceptivamente, sin embargo, el juego de todos los patrones sin componentes repetitivos obvios, incluyen muchas texturas deterministas y por lo tanto periódicas” [14].

Debido a la naturaleza aleatoria del patrón de speckle y su morfología, no resulta sencillo relacionarlo con algún patrón repetitivo o periódico, por ello, se utiliza el análisis de texturas como un atributo importante para obtener más información sobre las características de la imagen.

Puede establecerse que la textura es el resultado producido por las variaciones locales de brillo dentro de una región pequeña en una imagen. También se debe destacar que muchas texturas naturales muestran una combinación de regularidad, una periodicidad aproximada y una variación que es muy difícil de caracterizar por medio de herramientas matemáticas disponibles, usadas individualmente.

Generalmente se caracteriza la textura de una imagen mediante las variaciones bidimensionales en las intensidades. A partir de este planteamiento, se puede enunciar algunas propiedades de textura.

- La textura es una propiedad de áreas. No tiene sentido hablar de textura para un punto, ya que se explica observando la vecindad.
- La textura tiene que ver con la distribución espacial de las intensidades.
- La textura en una imagen puede percibirse a diferentes escalas. No es lo mismo observar una cadena montañosa en la lejanía, que una parcela en una ladera de la montaña.

La textura de una imagen posee diferentes cualidades que pueden servir para describirla, de las cuales se mencionan algunas para remarcar la dificultad en caracterizarlas: uniformidad, densidad, suavidad, rugosidad, regularidad, linealidad, dirección, frecuencia y fase. Algunas de ellas están relacionadas entre sí, como la frecuencia y la densidad.

Al poseer una textura tantos aspectos diferentes, algunos de ellos complejos, no es difícil comprender porque se han desarrollado tantos métodos para representarlas, los cuales no suelen adaptarse a todos los problemas satisfactoriamente, por lo que la elección de la mejor herramienta está directamente relacionada a la naturaleza del objeto en estudio.

Los principales métodos empleados en la caracterización de texturas de una región son los que se citan a continuación:

- **Métodos estadísticos**, basados en la media, la varianza, en histogramas regionales y sus momentos, en matrices de coocurrencia y en la función autocorrelación.
- **Métodos espectrales**, basados en el espectro de potencia de una región. Detectan periodicidad, orientación, etc.
- Métodos basados en **operadores morfológicos**: surgen de la morfología matemática, fundamentada en teoría de conjuntos.

3.2. Métodos estadísticos

La distribución espacial de los niveles de gris es uno de los parámetros que mejor permite caracterizar una textura. Por lo tanto, se pueden dividir las medidas de la siguiente manera:

- **Primer orden**: son calculadas a partir de los niveles de gris individuales y su frecuencia, como la media, varianza y desviación estándar. En estas medidas no se considera la relación entre los píxeles.
- **Segundo orden**: estudian la relación espacial de vecindad entre grupos de dos píxeles.
- **De orden superior**: se trabaja con matrices de dependencia del nivel de gris entre sus vecinos y matrices de secuencias de niveles de gris. Subsanan las limitaciones de las estadísticas de orden inferior para caracterizar ciertos tipos de texturas irregulares, a costa de un mayor procesamiento.

3.2.1. Momentos de primer orden

Los momentos de primer orden miden la probabilidad de observar un determinado nivel de gris en un lugar aleatoriamente elegido en la imagen, sin importar su interacción u ocurrencia con los valores de píxeles vecinos. La intensidad promedio de una imagen es un ejemplo de este tipo de estadísticas. Constituyen una de las formas más sencillas de describir la textura ya que, al no tener en cuenta las relaciones espaciales, consisten en el cálculo de los momentos del histograma de niveles de gris de una imagen o región.

Sea z una variable aleatoria que describe la intensidad de una imagen digital y sea $p(z_i)$ con $i = 1, 2, \dots, N$, su histograma, donde N es el número de niveles de intensidad diferentes. El momento n -ésimo de z respecto a la media m es:

$$\mu_n(z) = \sum_{i=1}^N (z_i - m)^n p(z_i) \quad (51)$$

Siendo m el valor medio de z :

$$m = \sum_{i=1}^N z_i p(z_i) \quad (52)$$

De la ecuación se puede observar que para $n = 0$, $\mu_0 = 1$ y para $n = 1$, $\mu_1 = 0$. Se destaca el momento segundo, denominado varianza $\sigma^2(z)$, que es una medida del contraste de la intensidad utilizado para establecer un descriptor de suavidad relativa.

El tercer momento mide la asimetría del histograma. Por ejemplo, un histograma desviado hacia niveles de intensidad bajos, evidencia de una imagen oscura, mientras lo opuesto describe una imagen brillante.

3.2.2. Momentos de segundo orden

A través de los momentos de segundo orden se obtiene la probabilidad de observar un par de valores de gris a lo largo de una línea imaginaria de longitud aleatoria, posicionada en la imagen en una ubicación y orientación, también aleatoria. En otras palabras, son propiedades estadísticas de pares de píxeles. La probabilidad de ocurrencia de todos los posibles pares de niveles de gris en una imagen suele ordenarse en una matriz denominada matriz de coocurrencia.

3.2.3. Matriz de coocurrencia de niveles de gris

La coocurrencia describe la frecuencia con que un nivel de gris aparece en una relación de vecindad espacial con otro nivel de gris en una imagen. Dicha matriz resume cuántas veces ocurren dos píxeles vecinos, uno con nivel de gris i y el otro con nivel de gris j , separados por una distancia d . La vecindad también tiene en cuenta relación angular entre ellos.

En otras palabras, la coocurrencia de los niveles de gris de una imagen digital se puede especificar mediante una matriz de frecuencias relativas con elementos P_{ij} en la que dos píxeles vecinos separados por una distancia d y una dirección θ ocurren en dicha imagen, un píxel con nivel de gris i y otro con nivel de gris j . La dimensión de la matriz es el número de niveles de cuantificación de gris de la imagen.

En la figura 3.1 se puede observar un ejemplo, donde se puede apreciar que la matriz de coocurrencia considera la relación espacial entre dos píxeles. Cada elemento de la matriz C_{ij} es el número de veces que en toda la imagen pasamos del nivel de gris i al nivel de gris j para una distancia d y un ángulo o dirección θ determinados.

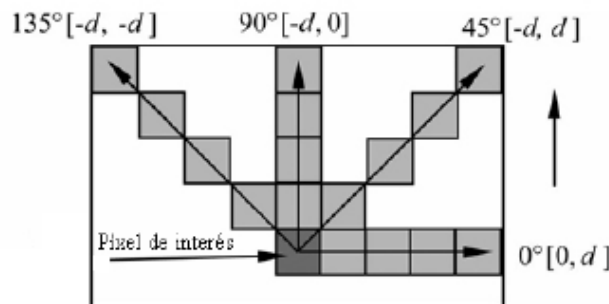


Figura 3.1 Direcciones de la matriz de coocurrencia

Una vez explicados los conceptos básicos de la matriz de coocurrencia, se procede a explicar un sencillo ejemplo para el cálculo de dicha matriz. Para este objetivo, se representa una imagen de prueba 4x4 píxeles (figura 3.2), donde cada celda corresponde al nivel de gris del pixel correspondiente.

0	0	1	1
0	0	1	1
0	2	2	2
2	2	3	3

Figura 3.2 Contenido matricial de la imagen de ejemplo

Únicamente, se consideran cuatro niveles de grises: $[0, 1, 2, 3]$. Además la matriz se ha rellenado aleatoriamente con dichos niveles, como ocurre con la distribución de la textura de un patrón de speckle ya que no es homogénea en todas las direcciones.

Mediante dicha imagen, se puede obtener 16 combinaciones distintas para calcular la matriz de coocurrencia. En la siguiente tabla se ilustra la plantilla que se debe rellenar con dichas combinaciones según la dirección y distancias indicadas Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Plantilla de la Matriz de Coocurrencia

Nivel de Gris	0	1	2	3
0	#(0,0)	#(0,1)	#(0,2)	#(0,3)
1	#(1,0)	#(1,1)	#(1,2)	#(1,3)
2	#(2,0)	#(2,1)	#(2,2)	#(2,3)
3	#(3,0)	#(3,1)	#(3,2)	#(3,3)

A continuación, se procede a calcular dicha matriz para una distancia $d = 1$ y para un ángulo $\theta = 0^\circ$, lo que es lo mismo a la dirección $[1,0]$, mostrado en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Matriz de Coocurrencia en dirección $[1,0]$

Nivel de Gris	0	1	2	3
0	2	2	1	0
1	0	2	0	0
2	0	0	3	1
3	0	0	0	1

Generalmente, se trabaja con la matriz de coocurrencia simétrica. Como se puede observar la matriz calculada para la dirección $[1,0]$ no es simétrica. Por lo tanto, para hallar la GLCM simétrica se puede realizar de dos formas.

- El primer cálculo, consiste en calcular también la matriz para la dirección contraria $[0,1]$, es decir, una distancia $d = 1$ y para un ángulo $\theta = 180^\circ$ y posteriormente, sumar las dos matrices obtenidas para direcciones opuestas. Un ejemplo se puede observar en la Tabla 3.3.
- Por otra parte, se puede calcular dicha matriz simétrica mediante la suma de la matriz original más la matriz traspuesta. Si se observa el ejemplo anterior, se obtiene que la matriz $[0,1]$ es la matriz traspuesta de $[1,0]$.

Tabla 3.3 Cálculo de Matriz de Coocurrencia simétrica

Matriz	0	1	2	3		[1,0]	0	1	2	3		[0,1]	0	1	2	3
0	4	2	1	0	=	0	2	2	1	0	+	0	2	0	0	0
1	2	4	0	0		1	0	2	0	0		1	2	2	0	0
2	1	0	6	1		2	0	0	3	1		2	1	0	3	0
3	0	0	1	2		3	0	0	0	1		3	0	0	1	1

Para finalizar con el cálculo, la matriz de coocurrencia se debe normalizar, lo cual genera una nueva matriz que indica la probabilidad de cada combinación según la distancia y dirección seleccionadas.

Por lo tanto, a dicha matriz se le aplica la siguiente expresión para obtener la probabilidad de cada celda.

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} C_{ij}} \quad (53)$$

Tras realizar la operación citada a cada término de la matriz, y continuando con el ejemplo anterior, se calcula finalmente, la matriz de probabilidad de coocurrencia.

Tabla 3.4 Matriz de probabilidad de coocurrencia

Matriz GLCM	0	1	2	3
0	1/6	1/12	1/24	0
1	1/12	1/6	0	0
2	1/24	0	1/4	1/24
3	0	0	1/24	1/12

Cabe destacar que en los cálculos computacionales no se trabaja con fracciones, sino con valores reales. En este caso, puesto que los valores de grises son valores discretos, y una probabilidad requiere de valores continuos, se trata de una probabilidad aproximada, pero perfectamente utilizable.

Observando los elementos de la matriz se puede obtener pequeñas conclusiones entorno a las características de la imagen.

- Los elementos de la diagonal muestran pares de píxeles con el mismo nivel de gris. Si tienen probabilidades grandes, la imagen no muestra mucho contraste.
- Sumando los valores de la diagonal se consigue la probabilidad de que un píxel tenga el mismo nivel de gris que su píxel vecino.

- Las líneas paralelas muestran pares de píxeles con diferencia de un nivel de gris. Si estuviesen separadas dos celdas, se tendrían una diferencia de dos niveles.
- Sumando las diagonales de la matriz se obtiene el “Grey Level Difference Vector” y también es utilizado como una medida de textura, aunque en este caso no se detalla.

A partir de este punto, ya se puede trabajar con la matriz, y se pueden calcular los descriptores de textura propuestos por Haralick [24]. En la Tabla 3.5 se listan los 14 descriptores de Haralick, mientras que en la Tabla 3.6 se citan otros descriptores adicionales.

Tabla 3.5 Descriptores de Haralick

DESCRIPTOR	FÓRMULA
Energía	$f_1 = \sum_i \sum_j c_{ij}^2$
Contraste	$f_2 = \sum_i \sum_j (i - j)^2 c_{ij}$
Correlación	$f_3 = \sum_i \sum_j (i - m)(j - m) c_{ij}$
Varianza	$f_4 = \sum_i \sum_j (i - m)^2 c_{ij}$
Momento Diferencial Inverso	$f_5 = \sum_i \sum_j \frac{1}{1 + (i - j)^2} c_{ij}$
Promedio de la Suma	$f_6 = \sum_{i=2}^{2N_g} i p_{x+i}(i)$
Varianza de la Suma	$f_7 = \sum_{i=2}^{2N_g} (i - f_6)^2 p_{x+i}(i)$
Entropía de la Suma	$f_8 = - \sum_{i=2}^{2N_g} c_{x+y}(i) \log(c_{x+y} c_{ij})$
Entropía	$f_9 = - \sum_i \sum_j c_{ij} \log(c_{ij})$
Varianza de la Diferencia	$f_{10} = \sum_{i=2}^{2N_g} (i - f_{11})^2 p_{x-i}(i)$
Entropía de la Diferencia	$f_{11} = - \sum_{i=2}^{2N_g} c_{x-y}(i) \log(c_{x-y} c_{ij})$
Medidas de Información de la Correlación	$f_{12} = \frac{f_9 - HXY1}{\max\{HX, HY\}}$ $f_{13} = \sqrt{1 - e^{[-2,0(HXY2 - f_9)]}}$
Coeficiente de Correlación Máximo	$f_{14} = 2^\circ \text{ mayor autovalor } \sum_k \frac{c(i, k)c(j, k)}{c_x(i)c_y(k)}$

Tabla 3.6 Descriptores de Haralick

DESCRIPTOR	FÓRMULA
Máxima Probabilidad	$\max\{c_{ij}\}$
Media	$\sum_i \sum_j i c_{ij}$
Momento de Inercia Inverso	$\sum_i \sum_j \frac{c_{ij}}{0,01 + (i - j)^2}$
Momento diferencial de orden k	$\sum_i \sum_j i - j ^k c_{ij}$
Momento diferencial Inverso de orden k	$\sum_i \sum_j \frac{c_{ij}}{ i - j ^k}$
Cluster shade	$\sum_i \sum_j c_{ij} (i + j - 2m)^3$
Cluster prominence	$\sum_i \sum_j c_{ij} (i + j - 2m)^4$

El coste computacional para hallar la matriz GLCM es elevado y aumenta a medida que lo hace la cantidad de niveles de intensidad y en menor grado de la distancia entre píxeles vecinos que se indique.

Por otra parte, en la definición anterior de los descriptores se puede observar que el cálculo de cada uno de ellos puede ser más o menos costoso, dependiendo de cada descriptor.

Para el desarrollo de este proyecto se van a utilizar principalmente cuatro descriptores básicos de la matriz de coocurrencia. A continuación, se procede a ampliar la información de los descriptores empleados.

- El contraste (c): aporta información acerca de las variaciones bruscas del nivel de gris en la imagen. Analizando la matriz GLCM se puede concluir que cuantos más elementos existan alejados de la diagonal principal mayor será el contraste.

$$c = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2 \quad (54)$$

- Correlación (γ): mide la dependencia lineal de los niveles de gris sobre los pixeles vecinos. También mide la complejidad de una imagen. A mayor valor de correlación, mayor complejidad tendrá dicha imagen.

$$\gamma = \sum_{i,j=0}^{N-1} \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sigma_i^2 \sigma_j^2} \right] P_{i,j} \quad (55)$$

- Homogeneidad (h): proporciona información sobre la regularidad local de la textura. Es lo opuesto al contraste, por lo tanto, es alta cuando los valores se concentran en torno a la diagonal principal.

$$h = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2} \quad (56)$$

- Energía (e): aporta una idea de la suavidad de la textura, lo cual, se refleja en la ubicación de sus probabilidades en la matriz coocurrencia.

$$e = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2 \quad (57)$$

3.2.4. Función autocorrelación

La función autocorrelación se define como la correlación cruzada de una señal consigo misma. Por lo tanto, resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de la señal, y se suele utilizar para medir espectros ópticos o el grado de coherencia de un campo electromagnético, entre otras aplicaciones.

En una imagen, una propiedad importante de muchas texturas es la naturaleza repetitiva de la ubicación de sus elementos de textura. La función autocorrelación puede ser usada en una imagen para evaluar su regularidad (periodicidad).

Formalmente, se parte de la función correlación unidimensional mediante la siguiente expresión:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x + \tau) f^*(x) dx \quad (58)$$

Donde f^* es el conjugado complejo de la función. De esta manera se puede generalizar dicha operación a dos dimensional para obtener:

$$R(\tau_1, \tau_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(x + \tau_1, y + \tau_2) f^*(x, y) dx dy \quad (59)$$

Posteriormente se puede calcular el coeficiente de autocorrelación $\rho(x, y)$ como la función autocorrelación dividida el valor máximo de la misma función que se encuentra en el origen ($\tau_1 = 0, \tau_2 = 0$).

$$\rho(x, y) = \frac{R(\tau_1, \tau_2)}{R(0, 0)} = \frac{\int \int_{-\infty}^{+\infty} f(x + \tau_1, y + \tau_2) f^*(x, y) dx dy}{\int \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x, y)|^2 dx dy} \quad (60)$$

Finalmente para poder trabajar con matrices, se discretiza la función autocorrelación para el tratamiento de una imagen $I(x, y)$, cuyo tamaño es $N \times N$ píxeles.

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} I(u, v) I(u + x, v + y)}{\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} I(u, v)^2} \quad (61)$$

La autocorrelación se relaciona con el tamaño de la primitiva de la textura. Si la textura es gruesa, ésta caerá lentamente. Sin embargo, si es fina, caerá rápidamente. Para texturas regulares, la función exhibirá picos y valles.

También está relacionada con el espectro de potencia de la transformada de Fourier. Según establece el teorema de Wiener-Khinchine, la función auto-correlación es la transformada inversa de Fourier de la densidad espectral.

3.2.5. Otros métodos de análisis

Existen otros métodos alternativos a los métodos estadísticos de primer y segundo orden que se mencionan a continuación con el mero objetivo de informar sobre su existencia y sus aplicaciones pero sin profundizar en ellos, puesto que no es objeto de estudio en este proyecto.

- **Métodos espectrales:** el espectro de Fourier es ideal para describir la dirección de patrones bidimensionales periódicos o cuasi-periódicos en una imagen. Estos patrones se observan como concentraciones de alta energía en el espectro. Analizando la posición de picos en el plano frecuencial se puede conocer la dirección predominante de los patrones de textura y su periodo.

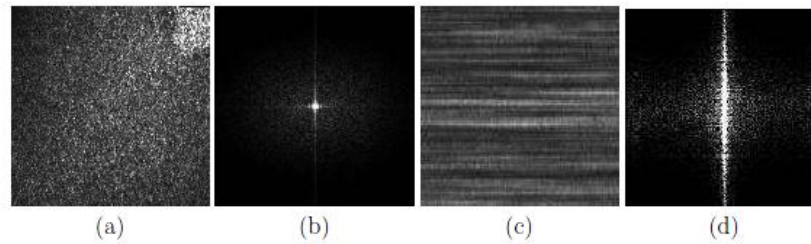


Figura 3.3 Métodos espectrales. (a) Patrón speckle sin movimiento y (b) su transformada de Fourier. (c) Patrón speckle con movimiento y (d) su transformada de Fourier.

En la figura 3.2 (a) se ilustra un ejemplo de un speckle aleatorio sin ninguna dirección predominante y en la figura 3.2 (b) su transformada de Fourier. En el segundo caso, se puede comprobar como el speckle se ha desplazado en vertical creando franjas horizontales borrosas y su transformada de Fourier indicando la dirección de tal desplazamiento.

- **Morfología matemática:** sus fundamentos se basan en la teoría de conjuntos, lo que ofrece un enfoque estándar a numerosos problemas de procesamiento de imágenes. Estos conjuntos representan la forma de los objetos en una imagen. Se trata de una herramienta sólida para el análisis de texturas pero implica trabajar con cierta complejidad.

3.3. Conclusión y comentarios

Tras analizar los distintos métodos de procesamiento de texturas que permiten realizar un estudio estadístico de los patrones de speckle, se opta por utilizar la matriz de coocurrencia de niveles de gris.

Puesto que es una técnica de segundo orden, tiene la ventaja de que mide la relación espacial entre píxeles y por lo tanto, al producirse variaciones en los patrones de speckle por pequeñas que sean, son captadas en la matriz de coocurrencia. Por esta razón, se focaliza el procesamiento de patrones mediante este método.

4

CAPÍTULO

4. MEDIDA DEL DESPLAZAMIENTO

4.1. Introducción

La interferometría con sensores de fibra, ofrece una gran sensibilidad, pero son vulnerables a factores medioambientales o son complicados de fabricar. Aunque, los sensores de atenuación en fibra ofrecen las ventajas de simplicidad y robustez frente a fuertes perturbaciones, su sensibilidad es mucho menor para su uso en medidas más reducidas.

Para la realización del proyecto se intenta desarrollar un sensor de fibra multimodo mediante las variaciones que sufre el patrón de speckle que se genera, el cual, presenta una gran sensibilidad ante cualquier perturbación que afecta a los modos por los que se propaga la luz. Este fenómeno se puede observar en la representación de la figura 4.1.

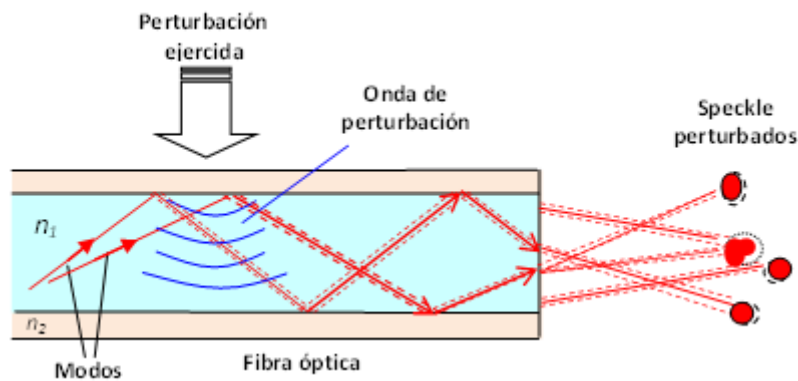


Figura 4.1 Fluctuaciones del speckle al perturbar la fibra.

Para el análisis teórico, se sigue el desarrollo llevado a cabo en la bibliografía [8] donde se realiza la medida mediante el producto interno de intensidad de los patrones de speckle. En dicho documento se demuestra que la sensibilidad del desplazamiento puede estar en un rango micrométrico.

Se ha mencionado que los efectos del patrón de speckle procedentes de una fibra multimodo y causados por una perturbación en la fibra fueron publicados por Bennett [15] y posteriormente, se expuso un análisis más detallado del ruido modal por Rawson y Goodman [13]. También se tiene en cuenta las propiedades espaciales de coherencia del speckle que genera la fibra óptica. Dicha investigación fue realizada por [35]. Sin embargo, una representación precisa entre la perturbación realizada en la fibra y el patrón de speckle generado está todavía sin resolver. En este caso, se trata de explotar la compleja naturaleza del speckle generado por la fibra para desarrollar un nuevo sensor conocido en inglés como: “fiber specklegram sensor”.

4.2. Fundamento teórico

En el análisis, se asume que la luz que se introduce en la fibra procede únicamente de una fuente de luz coherente, como es la del láser, y que todos los modos de la fibra son excitados igualmente.

Cuando la luz viaja a través de la fibra se ve limitada a viajar por un número discreto de modos que son determinados por la longitud de onda de la luz y por las características físicas de la fibra, como el radio del núcleo o el índice de refracción de núcleo y cubierta.

Como ya se definió, para valores de $a/\lambda \gg 1$, el número de modos se puede calcular mediante las aproximaciones (46) y (47).

De esta manera, se puede aproximar el número de modos al número de granos que presenta el patrón de speckle a la salida de la fibra. Por lo tanto, una gran cantidad de modos de propagación significa que la fibra creará un patrón de speckle muy granulado.

De acuerdo a lo descrito en el capítulo anterior, se puede expresar la distribución de campo lejano del speckle generado en la fibra, como la superposición de las amplitudes complejas de todos los modos según la ecuación:

$$A_0(x, y) = \sum_{m=0}^M a_{0m}(x, y) e^{j[\phi_{0m}(x, y)]} \quad (62)$$

Donde M es el número de modos de la fibra y $a_{0m}(x, y)$ y $\phi_{0m}(x, y)$ son las distribuciones de amplitud y la fase respectivamente, del modo m -ésimo. La intensidad del campo speckle capturado por una cámara CCD se puede escribir como:

$$I_0(x, y) = |A_0(x, y)|^2 = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{0m} a_{0n} e^{j[\phi_{0m} - \phi_{0n}]} \quad (63)$$

Si se produce algún cambio en el estado de la fibra (alguna perturbación), la salida del patrón de speckle varía y se puede expresar de la siguiente manera.

$$A_0(x, y) = \sum_{m=0}^M [a_{0m}(x, y) + \Delta a_m] e^{j[\phi_{0m}(x, y) + \Delta \phi_m]} \quad (64)$$

En donde, Δa_m es la desviación en amplitud y $\Delta \phi_m$ es la desviación de fase. Por lo tanto, la distribución de intensidad al producirse un cambio se puede expresar como:

$$I_0(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (a_{0m} + \Delta a_m)(a_{0n} + \Delta a_n) e^{j[\phi_{0mn} + \Delta \phi_{mn}]} \quad (65)$$

Teniendo en cuenta, las siguientes expresiones:

$$\phi_{0mn} = \phi_{0m} - \phi_{0n} \quad (66)$$

$$\Delta \phi_{mn} = \Delta \phi_m - \Delta \phi_n \quad (67)$$

El siguiente paso consiste en definir el producto interno de intensidad. Este término permite obtener la intensidad compuesta por la multiplicación de la intensidad del patrón de referencia con el patrón de medida, con lo que posteriormente se puede contabilizar la variación de dicha intensidad y relacionarlo con el desplazamiento realizado en la fibra.

$$IP = \iint I_0(x, y) I(x, y) dx dy \quad (68)$$

$$IP = \iint \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{0m} a_{0n} (a_{0i} + \Delta a_{0i})(a_{0j} + \Delta a_{0j}) e^{j[\phi_{0mn} + \phi_{0ij} + \Delta \phi_{ij}]} dx dy \quad (69)$$

Para simplificar la expresión se puede formular el producto de intensidad de la siguiente manera:

$$IP = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M B_{ij} e^{j(\Delta \phi_{ij})} \quad (70)$$

En donde el valor del nuevo término es:

$$B_{ij} = \iint \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{0m} a_{0n} (a_{0i} + \Delta a_{0i})(a_{0j} + \Delta a_{0j}) e^{j[\phi_{0mn} + \phi_{0ij}]} dx dy \quad (71)$$

A continuación, se define el producto de interno de intensidad normalizado (NIP) según la siguiente ecuación.

$$NIP = \frac{\iint I_0(x, y) I(x, y) dx dy}{[\iint I_0^2(x, y) dx dy \iint I^2(x, y) dx dy]^{1/2}} \quad (72)$$

Por lo tanto, como último paso, se puede simplificar la expresión de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$NIP = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M B_{ij} e^{j(\Delta\phi_{ij})}}{[\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M B_{ij}' \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M B_{ij}'']^{1/2}} \quad (73)$$

Donde se define,

$$B_{ij}' = \int \int \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{0m} a_{0n} a_{0i} a_{0j} e^{j[\phi_{0mn} + \phi_{0ij}]} dx dy \quad (74)$$

$$B_{ij}'' = \int \int \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (a_{0m} + \Delta a_m)(a_{0n} + \Delta a_n)(a_{0i} + \Delta a_i)(a_{0j} + \Delta a_j) e^{j[\phi_{0mn} + \phi_{0ij} + \Delta\phi_{mn} + \Delta\phi_{ij}]} dx dy \quad (75)$$

En esta situación, si la fibra no es perturbada, los dos patrones deberían ser idénticos, suponiendo que no existe ruido, y por lo tanto, se obtiene un valor de $NIP = 1$. Sin embargo, si la fibra es perturbada por algún medio físico, como puede ser un pequeño desplazamiento, se produce una variación en la fase y se genera un nuevo patrón de speckle lo que se traduce a una reducción de la NIP .

Si se supone que la perturbación en la fibra se realiza dentro un rango moderado, es decir, todos los modos presentan la misma amplitud antes y después de la perturbación, entonces se puede simplificar la expresión de la NIP según la siguiente ecuación.

$$NIP = \frac{1}{(M+1)^2} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N e^{j(\Delta\phi_{ij})} \quad (76)$$

Esta simplificación se obtiene al ignorar cualquier variación de la amplitud, lo que provoca que se igualen los términos $B_{ij} = B_{ij}' = B_{ij}'' = \text{constante}$.

Si denotamos como δ a la desviación máxima de fase entre el modo M-ésimo y el modo inicial se consigue la siguiente expresión:

$$\delta = \Delta\phi_{M0} = \Delta\phi_M - \Delta\phi_0 \quad (77)$$

También se puede asumir la desviación de fase $\Delta\phi_{ij}$ según la ecuación:

$$\Delta\phi_{ij} = \frac{i-j}{M} \delta \quad (78)$$

Por tanto, la variación de la *NIP* se puede expresar como una función de δ , tal como se ilustra en la figura 4.2. En ella, se puede observar como la *NIP* decrece monótonamente con respecto a δ entre el rango 0 y π .

Por otra parte, se puede asumir un sistema de desplazamiento formado por un conjunto de rodillos en contacto con la fibra óptica y con un desplazador o tornillo micrométrico que ejerce la fuerza específica para realizar el desplazamiento deseado, tal como se ilustra en la figura 4.3.

Este sistema permite transmitir pequeños desplazamientos transversales Δx en una elongación de la fibra, que afectará a la fase de los modos repercutiendo en el patrón de speckle que será modificado.

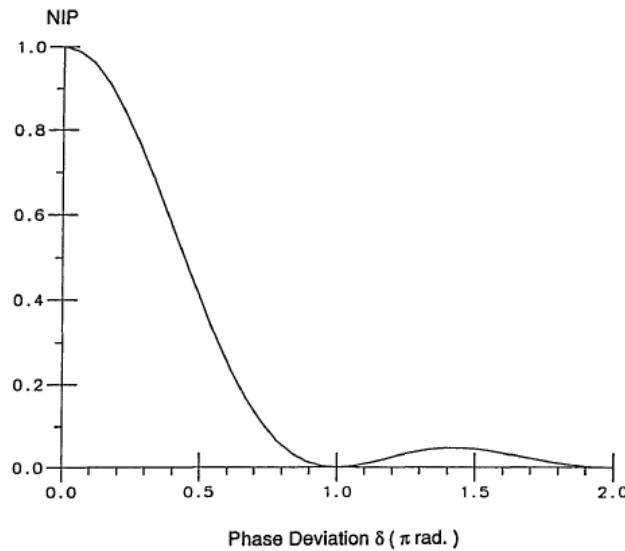


Figura 4.2 Representación de la NIP en función de la desviación máxima de fase

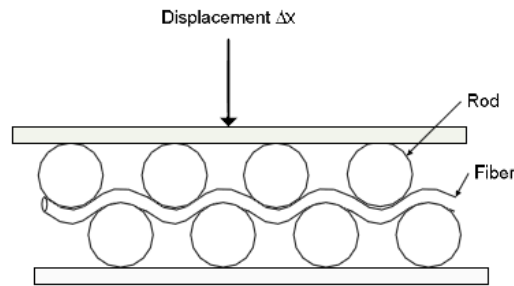


Figura 4.3 Sistema de rodillos que implementan el dispositivo de desplazamiento

Por lo tanto, el cambio de fase modal provocado por la elongación longitudinal de la fibra puede ser escrito como:

$$\Delta\phi_k = \frac{2\pi}{\lambda} C_0 \eta \Delta L \frac{1}{\cos\theta_k} \quad (79)$$

Donde λ es la longitud de onda de la fuente de luz, C_0 es el factor de tensión óptica, η es el índice de reflexión del núcleo de la fibra, ΔL es la elongación longitudinal de la fibra y θ_k es el ángulo de propagación en la fibra correspondiente al modo k -ésimo con respecto al eje de la fibra.

Por consiguiente, se reformular las ecuaciones anteriores correspondientes a las desviaciones de fase:

$$\Delta\phi_{ij} = \frac{2\pi}{\lambda} C_0 \eta \Delta L \left(\frac{1}{\cos\theta_i} - \frac{1}{\cos\theta_j} \right) \quad (80)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} C_0 \eta \Delta L \left(\frac{1}{\cos\theta_M} - \frac{1}{\cos 0} \right) < \pi \quad (81)$$

Por otra parte, si se considera que M es un número elevado de modos, entonces se puede aproximar el ángulo de propagación de la siguiente manera:

$$\theta_0 = 0 \quad (82)$$

$$\theta_M = \arcsen\left(\frac{\sin\theta_c}{\eta}\right) \quad (83)$$

Siendo θ_c el ángulo crítico.

En la siguiente figura, se ilustra el efecto de los rodillos, que al realizar un desplazamiento ejercen una tensión en la fibra que provoca la elongación longitudinal de la fibra.

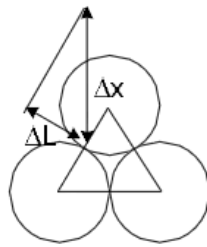


Figura 4.4 Desplazamiento y elongación

De acuerdo con la figura 4.4, se puede obtener la siguiente relación del desplazamiento transversal Δx con respecto a la elongación de la fibra ΔL y el número de rodillos empleados.

$$\Delta x = \frac{\Delta L}{2\alpha \sin 30^\circ} \quad (84)$$

Donde α es el número de rodillos que presenta el mecanismo implementado para realizar el desplazamiento.

Como conclusión, el desarrollo de este proyecto se basa en estas primicias. En donde, las variaciones de intensidad de los patrones de speckle se pueden aproximar a una expresión que depende del número de modos y por supuesto, de la variación de fase de cada modo. Por otro lado, el desplazamiento que se aplica en la fibra va a estar íntimamente ligado por la elongación que sufra la fibra.

4.3. Descripción del montaje experimental

El montaje básico para llevar a cabo los ensayos experimentales consta principalmente de los siguientes elementos que se citan a continuación.

4.3.1. Láser de gas de Helio - Neón

El Láser de He-Ne es un tipo de láser de gas que utiliza como medio activo una mezcla gaseosa de helio y neón. Estos láseres emiten, habitualmente, a una longitud de onda de 633 nm y, por lo tanto, en luz visible de color rojo. Un ejemplo de este tipo de fuente de luz puede observarse en la figura 4.5 que se ilustra.

La mezcla gaseosa está contenida en un tubo de vidrio cerrado, en una proporción de 5:1 aproximadamente y a una presión relativamente baja (habitualmente alrededor de 300 Pa).



Figura 4.5 Láser He-Ne utilizado en las medidas



Figura 4.6 Representación del funcionamiento del Láser He-Ne

La energía para el bombeo se consigue con una descarga eléctrica de unos 1.000 V a través de dos electrodos situados a cada extremo del tubo como puede observarse en la figura 4.6.

La cavidad resonante suele estar formada por un espejo plano de alta reflectancia en un extremo y un espejo cóncavo con una transmisión de un 1% al otro extremo. Todo ello es de pequeñas dimensiones, con una cavidad que no rebasa los 50 cm y que normalmente es de unos 15-20 cm.

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza este tipo de láser el cual, genera luz con alto grado de coherencia y muy colimada. Entiéndase luz colimada como la luz cuyos rayos son paralelos entre sí. Esta coherencia del láser permite que se produzca el fenómeno de interferencia que da lugar a la creación de patrones de speckle.

Las principales características del láser empleado en las pruebas experimentales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Características del láser utilizado

CARACTERÍSTICA	VALOR
Longitud de onda de emisión	$\lambda = 632.8 \text{ nm}$ (luz visible de color rojo)
Potencia óptica	4mW
Tipo de Haz	Colimando de diámetro inferior a 1mm
Tipo de Clase	Producto láser clase 3B

4.3.2. Fibra óptica utilizada

Se trata de un tramo de fibra óptica de alrededor de 30 metros por donde se propaga la luz y donde se contabilizan las perturbaciones realizadas. Para realizar la medida del experimento, se inyecta luz por un extremo y se captura la luz de salida por el otro extremo. Antes de llegar al extremo de salida, en una pequeña longitud de la fibra se le aplica la perturbación deseada.

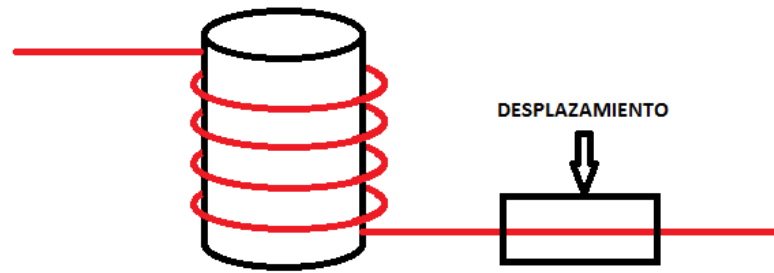


Figura 4.7 Tramo de fibra óptica utilizada como sensor

Este tramo de fibra descrito, recoge la perturbación realizada, pero también queda expuesto a otras perturbaciones causadas por fenómenos externos, lo que provoca que se inyecten en el sistema distorsionando las medidas.

En la figura 4.7, se puede observar la porción de fibra expuesta a la medida. Es de suponer, que al aplicar una perturbación como puede ser un desplazamiento en la fibra, sus propiedades se modifican, como pueden ser los modos de propagación, y por consiguiente la luz se ve alterada generando un nuevo patrón de speckle distinto al estado inicial sin perturbación.

En el banco de pruebas implementado, se utilizan tres tipos de fibras diferentes, con radios de núcleo muy diferentes para comprobar los diferentes efectos sobre las medidas.

- **Fibra de 50 micras.** Se trata de una fibra con un radio muy pequeño donde resulta difícil inyectar luz. Pese a esto, la fibra es multimodo y se puede obtener un patrón de speckle, formado por una pequeña cantidad de granos que se pueden corresponder con los modos de propagación. Al haber pocos modos, los granos son más grandes y provocan que la fibra sea más insensible tanto a fenómenos medioambientales como a perturbaciones realizadas.
- **Fibra de 250 micras.** Este tipo de fibra plástica es muy multimodo ya que posee una gran cantidad de modos de propagación. Es por ello, que es una fibra muy sensible a las perturbaciones realizadas pero donde otros fenómenos externos no afectan demasiado a la medida, por lo que el ruido modal influye en menor grado.
- **Fibra de 1mm.** Esta fibra posee un núcleo muy grande lo que da lugar a un elevado número de modos, provocando a su salida un patrón de speckle con numerosos granos de muy pequeño tamaño. Esta fibra es la más sensible a cualquier factor. Por lo tanto, la influencia del ruido modal es bastante elevada con respecto a las otras dos fibras ópticas.

Por último, se expone la Tabla 4.2 con las diferentes características de las tres fibras empleadas y el número aproximado de modos en que se propaga la luz para un longitud de onda correspondiente a la de emisión del láser.

Tabla 4.2 Número de modos de las fibras utilizadas

Material del núcleo	Diámetro del núcleo (μm)	Índice de refracción (n_{co})	Apertura Numérica	Nº de modos ($\lambda = 0.6328$)
PMMA (salto de índice)	980	1.49	0.5	3.082.691
PMMA (salto de índice)	240	1.49	0.5	184.884
PF-POF (índice gradual)	50	1.342 – 1.358	0.2	665

4.3.3. Desplazador micrométrico

Por otra parte, se debe destacar el dispositivo que permite aplicar un desplazamiento micrométrico en la fibra. Se compone de dos elementos básicos. En primera instancia, se encuentra la base que sirve de interface sobre la fibra óptica. En la figura 4.8 se ilustra un ejemplo donde se pueden apreciar las dos partes descriptas.

El hecho de utilizar placas con dientes, en vez de placas planas, facilita la realización de la perturbación en sitios puntuales de la fibra permitiendo de esta forma obtener una mejor calidad en las medidas, al aumentar la sensibilidad de la fibra.

El tornillo permite realizar desplazamientos micrométricos manualmente de $1\ \mu\text{m}$ de precisión aproximadamente. El soporte está fijo, y la punta está en contacto con la placa dentada superior. Al realizar un pequeño desplazamiento, la bola aprieta la placa y esta redistribuye la fuerza entre sus dientes para perturbar a la fibra y así contabilizar el desplazamiento realizado.

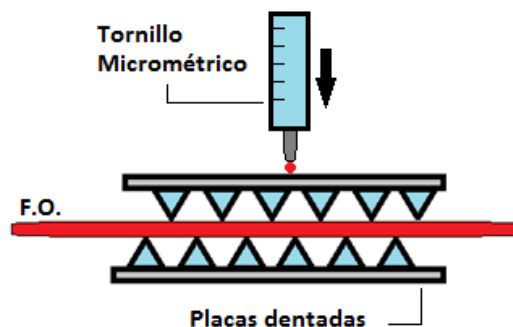


Figura 4.8 Ilustración del sistema implementado para el desplazamiento

4.3.4. Cámara de captura

El siguiente elemento que constituye el sistema de medida es el dispositivo permite capturar los patrones de speckle para su posterior procesamiento. Dado que se quiere un sistema barato se implementa el montaje con una cámara básica de usuario conocida como “webcam”.

Se trata de una cámara digital conectada a un ordenador, a través del puerto USB. El software de la cámara web toma un fotograma de la cámara cada cierto tiempo. Si lo que se pretende es utilizar esas imágenes para construir un video de calidad sin saltos de imagen, se necesitará que la cámara web alcance una tasa de unos 15 a 30 fotogramas por segundo.

La cámara está formada por una lente, un sensor de imagen y la circuitería necesaria para utilizarla.

Existen distintos tipos de lentes, siendo las lentes plásticas las más comunes. Los sensores de imagen pueden ser CCD (charge coupled device) o CMOS (complementary metal oxide semiconductor). La cámara empleada incorpora un sensor CMOS que permite obtener una resolución VGA (640x480 píxeles) con una profundidad de color de 24 bits RGB y con una tasa de hasta 30 fotogramas por segundo que es suficiente para realizar las medidas deseadas.

Para la realización de los experimentos se desmonta la cámara y se desecha la lente que incorpora, ya que introduciría un factor óptico a tener en cuenta. Se emplea la cámara sin lente para captar la luz de salida de la fibra y obtener el patrón de speckle generado sin ninguna modificación óptica.

La siguiente figura ilustra el montaje básico de captura formado por la carcasa de la cámara, la circuitería interna, el cable USB, el sensor óptico de captura y una pieza transparente de plástico, indicada como acoplador en la figura 4.9, que se ha realizado para insertar la fibra óptica al interior de la cámara y proyectar el patrón de speckle sobre el sensor óptico. Esto permite obtener casi la totalidad del speckle generado en la fibra, puesto que la distancia de separación entre fibra y sensor oscila entre 1 o 2mm.

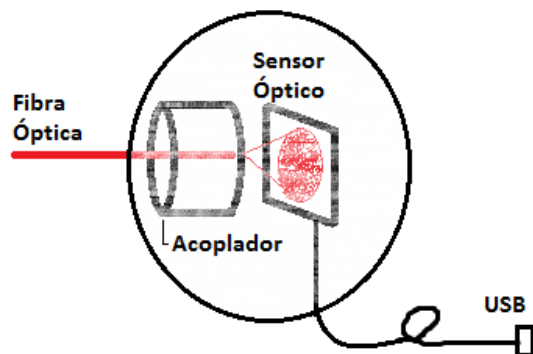


Figura 4.9 Representación esquemática de la cámara de captura

4.3.5. Software del ordenador

Por último, se procede a explicar las funciones básicas que realiza el ordenador. Para el experimento, el computador puede ser tratado por una parte, como un registro donde se guardan las capturas realizadas por la cámara y por otra parte, como un dispositivo de procesamiento de datos y representación de los resultados obtenidos.

En primer lugar, en el ordenador se guardan las medidas en formato de vídeo sin comprimir. Estos vídeos tienen una tasa de treinta imágenes por segundo (30 fps) con una resolución máxima de 640x480, lo que proporciona una calidad aceptable para capturar los patrones de speckle. Para realizar la captura, se utiliza el software o programa conocido como Matlab.

Matlab (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

En nuestro caso, se utiliza la herramienta de trabajo “*imaqtool*” que permite la conexión entre dispositivos de captura de video e imágenes en distintos formatos. Gracias a ésta herramienta, se pueden controlar las propiedades de la cámara, lo que permite manipular manualmente dichas propiedades para que cuando se estén capturando los patrones de speckle, estos no se vean afectados por un cambio automático en el contraste o la exposición, lo cual sería totalmente perjudicial para las medidas.

Posteriormente, con los datos obtenidos de las medidas se inicia el procesado y manipulación de los datos. Para ello, se manejan diversos algoritmos, que después de un estudio teórico son los que mejores resultados pueden reportar. En el siguiente apartado, se explicarán estos algoritmos con sus características básicas y en el posterior capítulo se analizarán los resultados obtenidos con cada uno.

4.3.5.1. Procesamiento de datos

Existen varios procedimientos que nos pueden permitir encontrar una relación entre la variación del patrón de speckle y el desplazamiento realizado en la fibra. Por ello, se da paso a enumerar y remarcar los algoritmos que pueden ser de gran relevancia para el objetivo que se acomete.

- **Correlación cruzada:** consiste en tomar la primera imagen como referencia correspondiente al patrón de speckle sin perturbación y a continuación, realizar la correlación cruzada entre la imagen de referencia y la nueva imagen que deriva de un patrón de speckle distinto tras realizar una perturbación. Este procesamiento se puede realizar en dos dimensiones X e Y si se trabaja con matrices o en una sola dimensión al trabajar con vectores.
- **Autocorrelación:** es un algoritmo más sencillo que el anterior y por consiguiente utiliza menos tiempo de procesado. Consiste en realizar la autocorrelación de cada imagen y posteriormente, se representan los resultados obtenidos. Para simplificar, se suele trabajar con un conjunto de vectores y se promedian para obtener un resultado.
- **Diferencia de imágenes:** consiste en tomar una imagen como referencia y realizar la resta en valor absoluto con la otra imagen consecuente afectada por una perturbación. Esta diferenciación permite obtener la actividad sufrida en el speckle. Si el speckle es poco activo, la imagen resultante de la resta será muy oscura con pocos puntos claros. Por el contrario, si es muy activa aparecerán numerosos puntos brillantes correspondientes a los granos del speckle que se han modificado.
- **Producto interno de intensidad:** se basa en el mismo concepto que la diferencia de imágenes solo que se multiplican en vez de restar. Se puede calcular la energía de cada imagen compuesta por dos imágenes multiplicadas y comprobar su variación en función del desplazamiento realizado.
- **Matriz de coocurrencia:** se trata de un análisis textural de segundo orden en el cual se realiza el cálculo de la matriz de coocurrencia para cada imagen y posteriormente, se obtienen los descriptores básicos. Los más importantes son el contraste, la correlación y la energía.

4.4. Pruebas preliminares

Antes de proceder a exponer los resultados obtenidos, se enumeran las medidas previas que se han realizado, y como ha ido evolucionando el montaje implementado y en mayor medida el procesamiento de los datos para su posterior análisis. Para ello, se citan los métodos de análisis utilizados junto con algún ejemplo y se añade una breve descripción de la repercusión que tiene las medidas experimentales.

4.4.1. Métodos estáticos

Para el desarrollo de los experimentos, se captura únicamente una imagen para cada desplazamiento que se realiza. Estos métodos suponen que el patrón de speckle que se genera es estático y mientras no se aplique un nuevo desplazamiento dicho patrón no sufrirá ninguna variación.

4.4.1.1. Medida del desplazamiento mediante la correlación de los patrones de speckle individuales

Este método trata de obtener una relación de correlación entre un patrón de speckle que sirve de referencia, donde no se aplica ningún desplazamiento, y patrones tomados posteriormente, donde se va incrementando el desplazamiento aplicado en la fibra.

La figura 4.10 representa el cálculo de la correlación cruzada entre el patrón de referencia ($0 \mu m$) y el resto de patrones donde se aplica un desplazamiento.

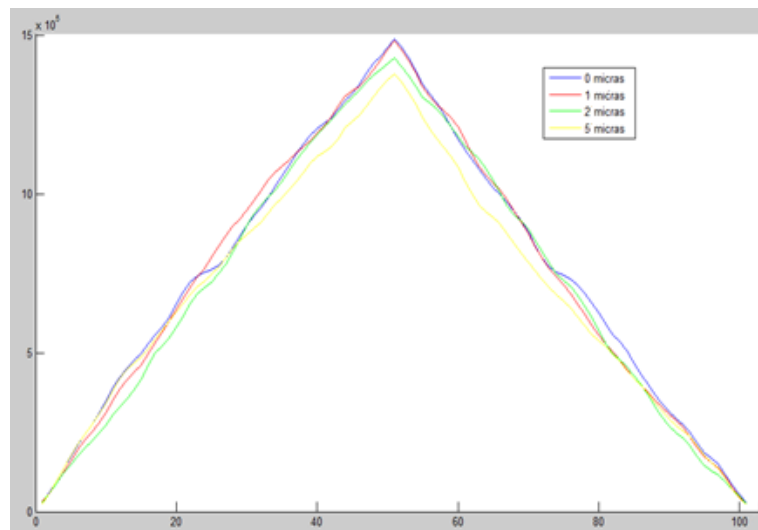


Figura 4.10 Correlación de los patrones de speckle

Mediante la correlación de imágenes tomadas estáticamente, se observa que la pendiente permanece casi constante para cada desplazamiento, sin embargo, el pico máximo de la correlación tiende a decrecer a medida que dicho desplazamiento va incrementándose. No obstante, tras repetir varias veces este experimento, no se cumple dicha relación en todas las medidas por lo que se procede a buscar otro método que aporte mayor información.

4.4.1.2. Matriz de coocurrencia de niveles de gris de patrones de speckle individuales

Para el desarrollo de esta técnica se ha tomado una imagen de cada patrón de speckle, según el desplazamiento aplicado, a la salida de la fibra. Dichas imágenes son procesadas siguiendo los pasos que se mencionan a continuación.

1. Se convierte la imagen de RGB a Escala de Grises.
2. Se calcula la matriz de coocurrencia de dicha imagen.
3. Se obtienen los descriptores básicos y se analizan.

La figura 4.11 representa los descriptores básicos de la matriz de coocurrencia de cada patrón de speckle, en función de la distancia de separación entre píxeles vecinos denominada *offset*.

Si se analizan las gráficas obtenidas, se comprueba que el mejor descriptor resulta ser la energía de la matriz de coocurrencia, puesto que a medida que se incrementa el desplazamiento en la fibra, la energía tiende a reducir su valor para cualquier valor de *offset*. Al igual que el método anterior, tras repetir varias veces el experimento y su posterior procesado, no se puede concluir con una relación coherente de las medidas obtenidas con los desplazamientos realizados.

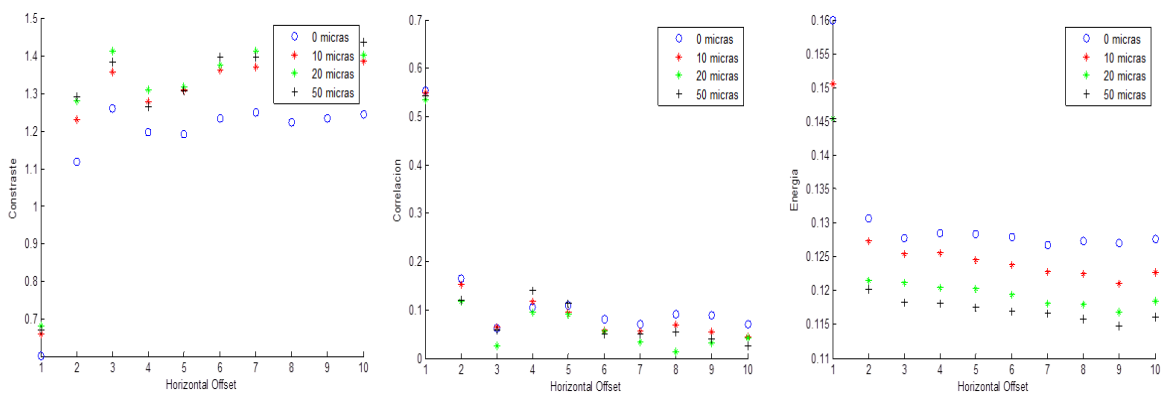


Figura 4.11 Descriptores de la matriz de coocurrencia

4.4.1.3. Métodos de las diferencias

Como ya se explicó en el capítulo anterior, esta técnica se basa en realizar la diferencia entre patrones de speckle y comprobar su evolución. Para su desarrollo, se realiza la resta de las intensidades del primer patrón de speckle que sirve de referencia con los consecutivos patrones. Esta evolución puede apreciarse en la figura 4.12.

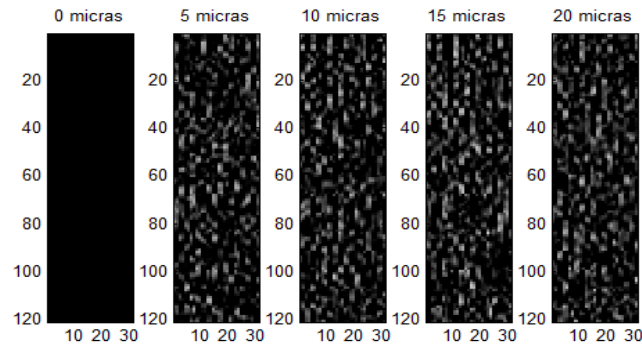


Figura 4.12 Diferencia de patrones de speckle

En este caso, los puntos brillantes corresponden a zonas con gran actividad, en donde la variación del patrón ha variado considerablemente respecto con el patrón de referencia. Por lo tanto, a mayor actividad, mayor variación y por consiguiente, mayor valor de intensidad se obtiene en ese punto.

Tras realizar la diferencia entre patrones se calcula la correlación cruzada entre los resultados obtenidos para buscar una relación que aporte alguna información más coherente. La figura 4.13 ilustra un ejemplo de los resultados obtenidos.

Como se puede comprobar visualizando la gráfica, no hay una relación obvia a simple vista que relacione los desplazamientos realizados con los resultados obtenidos.

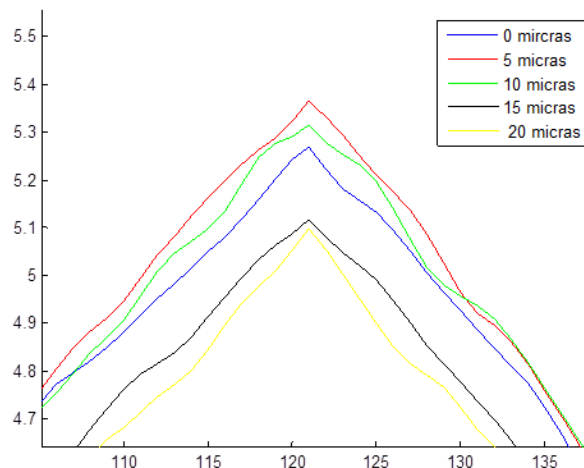


Figura 4.13 Resultados de la correlación de la resta entre patrones

4.4.1.4. Otros métodos implementados

A parte de los métodos citados, se desarrollan otros métodos de procesado de los patrones como pueden ser:

- La detección de bordes de los patrones de speckle, donde, con ayuda de funciones se realiza un filtrado de los patrones de speckle y después se procesan. Es una técnica similar a la diferencia de imágenes, pero no llega a aportar información muy precisa, por lo que también es descartada.

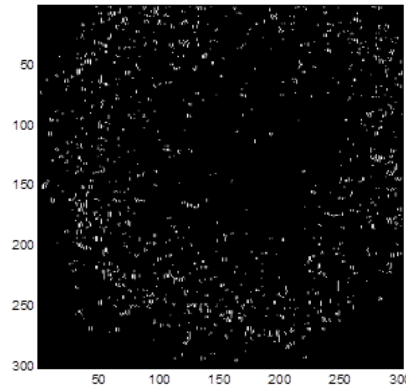


Figura 4.14 Filtrado mediante detección de bordes

- Evolución de la actividad de un grano de speckle. Se trata de aislar un grano dentro del patrón de speckle y seguir su evolución en los diversos patrones de speckle. Para obtener un buen resultado de dicha actividad debería aislarse el sistema de medida completamente frente a cualquier perturbación lo que resulta imposible en el sistema desarrollado.

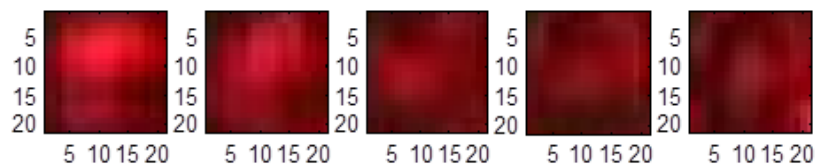


Figura 4.15 Evolución de un grano del patrón de speckle

- Cálculo del producto interno de intensidad. Es otro método similar a la diferencia de patrones, sin embargo, en vez de realizar la resta se realiza la multiplicación del patrón de referencia con los consiguientes patrones posteriores. Obviamente, aporta cierta información acerca de las variaciones de los patrones pero no resulta ser muy precisa al repetir varias veces el experimento.

Todas las técnicas implementadas mediante el análisis de speckle estático, reportan cierta información sobre la variación que sufren los patrones de speckle pero no permiten definir una relación clara y coherente entre dichas variaciones y los desplazamientos que se aplican en la fibra óptica. Por esta razón, se procede a implementar nuevos métodos basados en análisis temporales.

4.4.2. Métodos dinámicos

Tras analizar los métodos llevados a cabo para el análisis de patrones se procede a realizar un estudio más exhaustivo al incluir la variable del tiempo. En vez de trabajar con medidas de speckle estático, capturando una imagen por cada desplazamiento, se capturan videos de 30 imágenes por segundo para comprobar la evolución del speckle generado en la fibra, tanto en función del tiempo, como en función del desplazamiento aplicado.

Como la fibra se ve afectada por el ruido modal, provoca que los patrones de speckle estén fluctuando constantemente. Estas variaciones provocan que los resultados obtenidos con los métodos anteriores no sean concluyentes debido a que se introducen una variación adicional a tener en cuenta causada por el ruido modal.

La mejor técnica para reducir el efecto del ruido es promediar las medidas, y por ello, tras realizar los experimentos capturando videos se obtienen resultados mucho más coherentes con los desplazamientos en fibra.

Los videos son procesados mediante las técnicas descritas anteriormente, pero la técnica de procesamiento que aporta una relación más precisa de correlación entre patrones de speckle y desplazamiento es la matriz de coocurrencia. Por esta razón, los experimentos finales se realizan mediante el cálculo de dicha matriz.

En el próximo capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la técnica de la matriz de coocurrencia de niveles de grises, la cual, ha sido elegida como el método de procesamiento para el desarrollo de este trabajo.

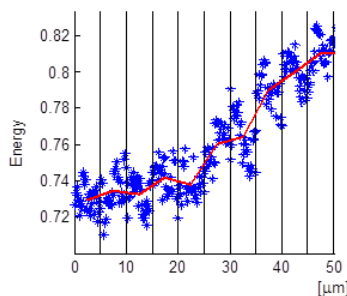


Figura 4.16 Energía de la matriz promediada en el tiempo

4.5. Montaje implementado

Para finalizar, se trata de ilustrar el montaje final que permite llevar a cabo las pruebas experimentales para medir el desplazamiento mediante la captura de patrones de speckle y su procesamiento con ayuda de la matriz de coocurrencia. El conjunto concluyente, está formado por los elementos anteriormente descritos. Se puede observar en la figura 4.17 que se trata de un montaje muy intuitivo.

Cabe destacar que el acoplo de la luz en fibra se realiza haciendo incidir el rayo de emisión del láser sobre el punto extremo de la fibra y ajustando manualmente la posición de la fibra tanto en el eje horizontal como en el eje vertical hasta obtener un buen acoplo de luz y una buena calidad del patrón de speckle.

Si se inyecta poca luz, el patrón se verá muy difuminado y presentará mala calidad o incluso nula.

Por el contrario, si se inyecta demasiada luz, el sensor óptico de la cámara se satura produciendo un patrón sobreexpuesto o quemado, lo que repercute considerablemente en su calidad.

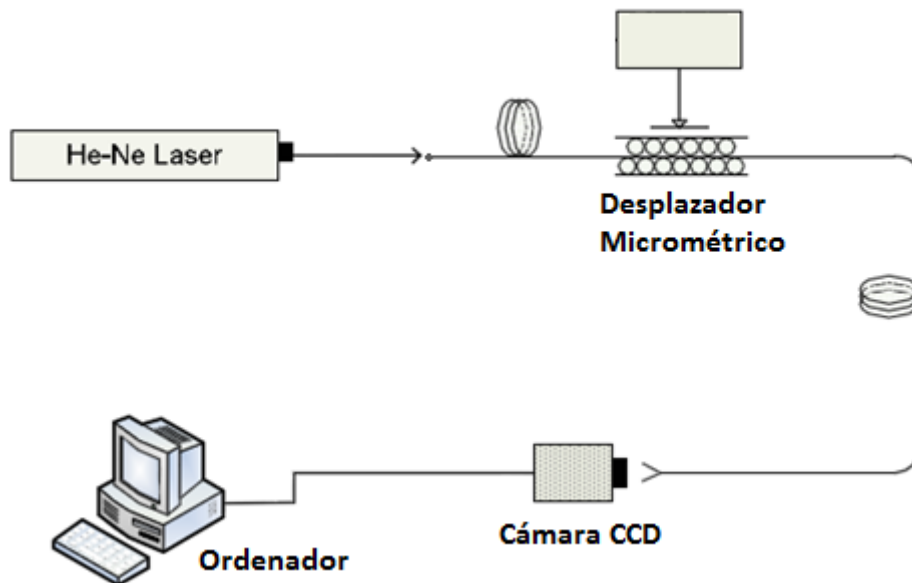


Figura 4.17 Esquema global del montaje implementado

Por último, la figura 4.18 ilustra el montaje experimental que se ha realizado y que se corresponde con el diagrama proporcionado en la figura 4.17.

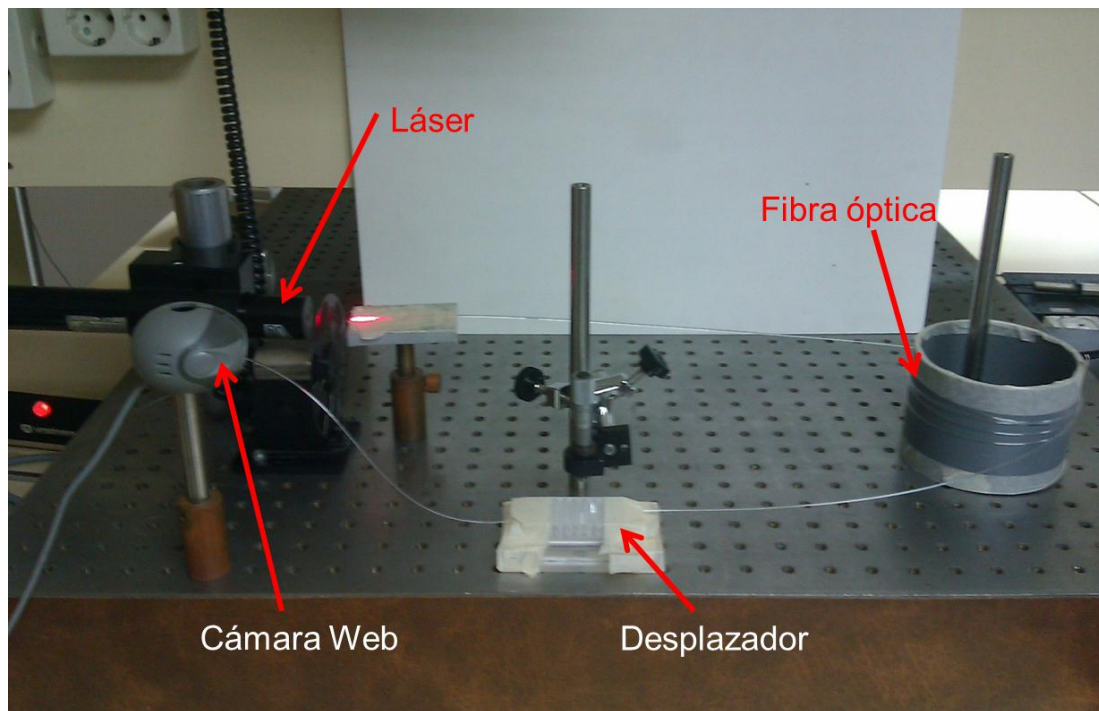


Figura 4.18 Montaje experimental de proyecto

5

CAPÍTULO

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Condiciones de medida

Este capítulo trata de recoger los resultados obtenidos al procesar las medidas realizadas para diversos tipos de fibra óptica mediante varios métodos distintos de análisis de texturas. En concreto, se estudian los patrones de speckle generados por las fibras descritas en la sección 4.3.2 y la calidad de medida que pueden reportar.

Para llevar a cabo, las pruebas oportunas, primero se lleva a cabo el montaje descrito en la figura 4.17 del apartado anterior. En este caso, se capturan las medidas en forma de video que posteriormente, serán procesadas mediante Matlab. Antes del proceso de captura se debe configurar la cámara, dónde principalmente, se activa en modo manual y se fija una exposición adecuada para obtener un buen patrón de speckle. También se fija un flujo de datos de 30 imágenes por segundo con una resolución de 640x480 píxeles.

A partir de este punto, ya no se vuelven a tocar las propiedades de la cámara puesto que si se varía, por ejemplo, el contraste o la exposición, se repercutiría negativamente en la captura de patrones y se falsearían las medidas realizadas.

Otra configuración importante es como se construye el vídeo. En este proceso, se suele fijar un tiempo de 20 segundos aproximadamente y un disparo (*trigger*) manual. Lo que permite obtener un total de $M = 20s \cdot 30fps = 600$ muestras. El disparo manual consiste en que cada vez que se pulsa el botón de disparo, la cámara captura 30 imágenes en un tiempo inferior a un segundo, el video concluye cuando coinciden el número de disparos con el número de segundos. Esta ventaja permite realizar un video en el que cada segundo, o cada 30 imágenes se corresponde a un desplazamiento distinto. Para ello, entre disparo y disparo se puede realizar el desplazamiento que se desee y a continuación pulsar el botón de disparo para que sea registrado en el vídeo. Cabe destacar que cada desplazamiento se efectúa manualmente y se intenta llevar a cabo una distancia constante entre desplazamientos.

Por último, una vez realizados los vídeos mediante el proceso descrito, se procede a procesarlos mediante las técnicas de análisis textual de las imágenes que componen dichos vídeos.

Una vez descrito el proceso de captura, se procede a profundizar sobre el procesamiento de las imágenes con ayuda del software Matlab. El principal objetivo consiste en relacionar los desplazamientos realizados procesando los patrones de speckle mediante la matriz de coocurrencia. No obstante, también se han llevado a cabo otros métodos de procesamiento de imágenes como son la correlación, la diferenciación y el producto interno de intensidades, pero han reportado peores resultados.

A continuación, se expone el procedimiento seguido para hallar la matriz de coocurrencia (*GLCM*) y representar los resultados obtenidos. Para su cálculo, se emplea la función “graycomatrix” que incorpora Matlab. Esta función permite definir la dirección a seguir para su cálculo mediante un vector de coordenadas. Así, por ejemplo, si se indica un vector [0,1] se buscará la relación de coincidencia en una dirección 0°, o sea, hacia la derecha, entre pixeles vecinos separados una distancia de un pixel. Otro parámetro importante a definir dentro de la función es la simetría de la matriz. Si se indica un valor “true” la matriz GLCM será simétrica, lo que significa que su cálculo se realiza en la dirección indicada y en la opuesta, por ejemplo en 0° y 180°.

Matlab incorpora otra función importante llamada “graycoprops” y que permite hallar cuatro de los descriptores básicos definidos por Harilick [24]. Al invocar a la función e indicarle la matriz de coocurrencia, ésta devuelve los descriptores de:

- Contraste
- Homogeneidad
- Correlación
- Energía

Estos parámetros son propios de la matriz de coocurrencia y no se deben confundir con otros parámetros propios de la imagen. Así, el contraste o la energía de la imagen no coinciden con el contraste o la energía de la matriz de coocurrencia. Lo mismo sucede para la homogeneidad y la correlación.

Como paso final, falta representar los datos obtenidos referentes a los descriptores de la matriz de coocurrencia en función del desplazamiento realizado. Para ello, y dependiendo del tipo de gráfica se intenta ilustrar en el eje horizontal el desplazamiento realizado y en el eje vertical los valores normalizados de los descriptores.

Una vez explicado todo el proceso de captura y cómputo realizado, se procede a exponer el desarrollo de cada experimento.

5.2. Resultados con fibra de 1mm

En la figura 5.1, se trata de ilustrar el patrón de speckle de una de las imágenes contenidas en el video realizado y a su derecha se muestra su correspondiente histograma de niveles de grises.

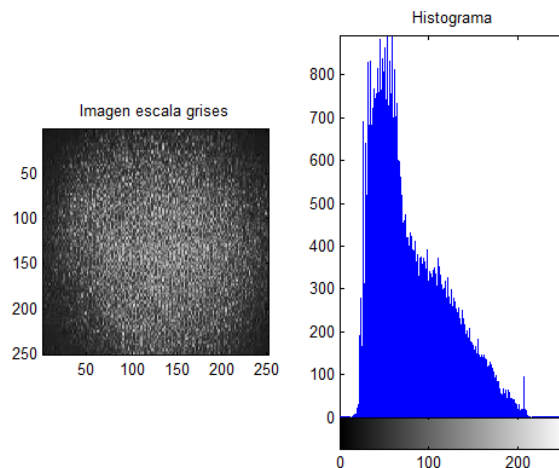


Figura 5.1 Patrón de speckle de una muestra e histograma

A continuación, se representan los tres descriptores de la matriz de coocurrencia hallados. A saber, el contraste, la correlación y la energía. Como aclaración, indicar que cada línea vertical indica el paso o distancia entre un desplazamiento y el siguiente realizado, por lo tanto, en entre cada línea se representan 30 valores correspondientes a cada una de las 30 imágenes capturadas para ese desplazamiento. En este caso, se realiza una variación constante de $5\mu m$ de separación entre desplazamientos.

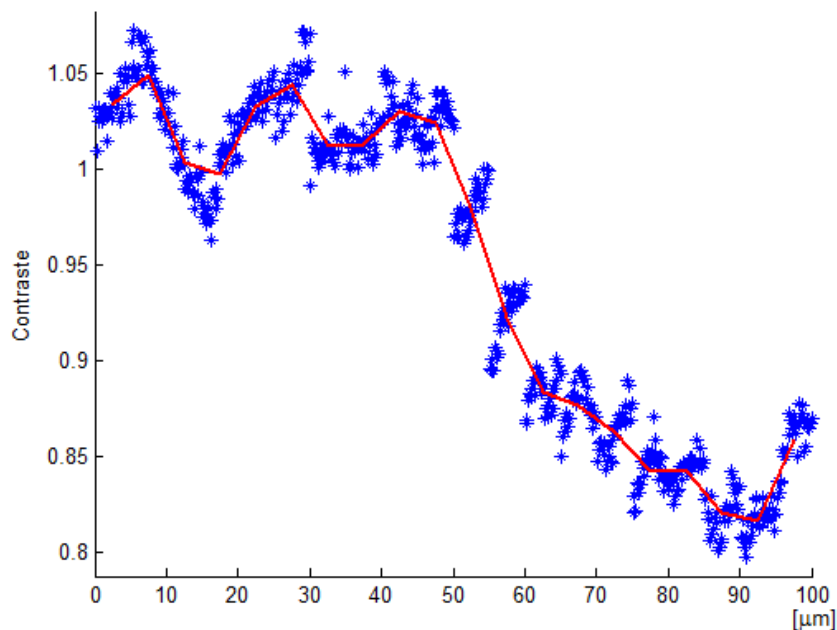


Figura 5.2 Evolución del contraste de la matriz

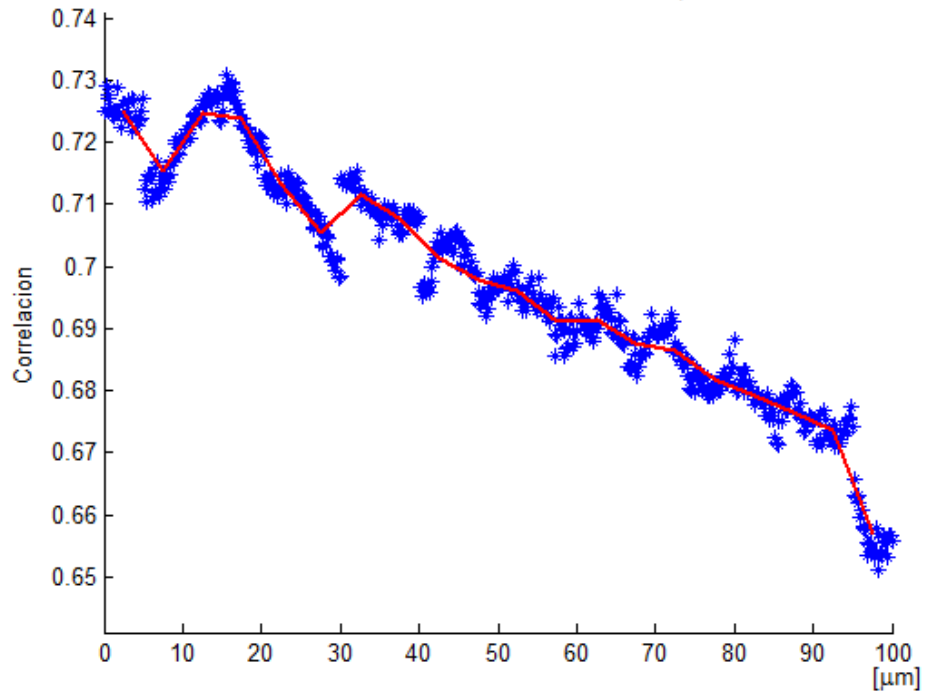


Figura 5.3 Evolución de la correlación de la matriz

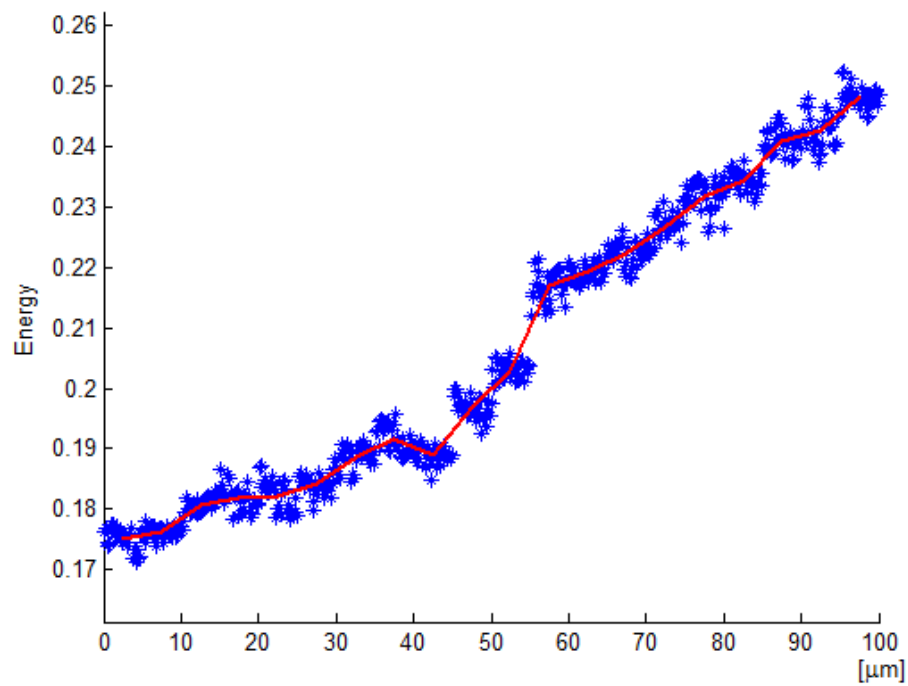


Figura 5.4 Evolución de la energía de la matriz

Respecto al contraste, se puede observar una variación un tanto oscilante debido a que el patrón de speckle varía de forma casi aleatoria para cada medida. Si se analiza la gráfica correspondiente a la correlación se observa que posee una pendiente negativa, ya que a medida que se el desplazamiento se va incrementando el valor de la correlación va disminuyendo casi proporcionalmente. Sin embargo, la energía presenta un comportamiento opuesto al contraste y a la correlación debido a su definición. Este descriptor presenta una pendiente positiva, la cual, tiene poca oscilación y es muy proporcional al desplazamiento realizado.

Puesto que el mejor descriptor de la matriz de coocurrencia es la energía, se procede a realizar un análisis más profundo de dicha propiedad y de esta manera, caracterizar de forma efectiva las medidas realizadas y su relación con el desplazamiento inducido en la fibra.

Se quiere aproximar la función de la energía a una función que sea sencilla en cuanto a trabajo de cómputo se refiere, puesto que una función complicada introduciría una complejidad excesiva en el sistema implementado. Por ello, se ha optado por realizar un ajuste de la curva mediante polinomios. Matlab permite calcular los coeficientes del polinomio de grado N que se indique, mediante la técnica de mínimos cuadrados. En la siguiente figura, se ilustran tres gráficas donde se ha realizado un ajuste de la función de la energía para tres polinomios. Uno de grado 1, correspondiente a una recta. Un segundo polinomio de grado 2 o parábola y un tercer polinomio de grado 3.

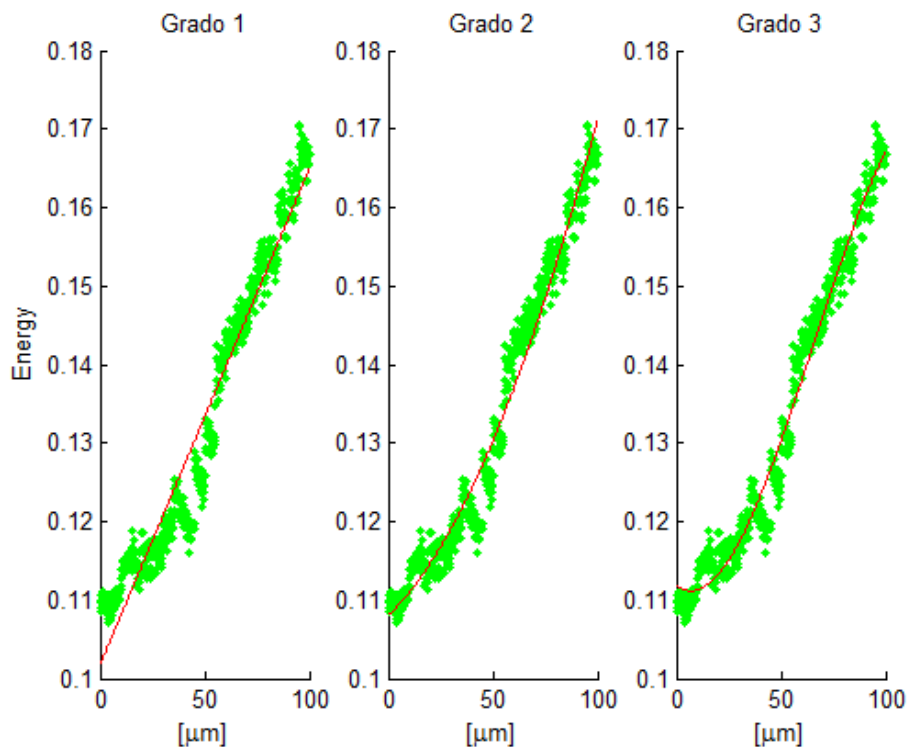


Figura 5.5 Ajuste de la energía mediante polinomios

A continuación, se exponen las ecuaciones de los polinomios calculados en el ajuste mediante la tabla 5.1 y que se corresponden con las gráficas ilustradas anteriormente. En ellos, se puede observar que se manejan coeficientes de valor muy pequeño debido a la escala en que se presenta la energía de la matriz de coocurrencia.

Tabla 5.1 Ecuaciones de los polinomios del ajuste

Polinomio	Ecuación
Grado 1	$E = 6,32 \cdot 10^{-4}X + 0,1018$
Grado 2	$E = 3,7 \cdot 10^{-6}X^2 + 2,61 \cdot 10^{-4}X + 0,108$
Grado 3	$E = -7,9 \cdot 10^{-8}X^3 + 1,6 \cdot 10^{-5}X^2 - 2,14 \cdot 10^{-4}X + 0,112$

Para cada ajuste o aproximación, conviene calcular el error cometido y comprobar de esta manera cual se ajusta mejor a la función de energía. Por esta razón, se representa a continuación, el error residual R cometido en los ajustes, para cada uno de los puntos. Este error residual lo proporciona Matlab al realizar el ajuste.

Se puede observar claramente en la figura 5.6 que el ajuste de la recta presenta el mayor de los tres errores ilustrados. Al aumentar el grado del polinomio se consigue reducir el error y de esta forma mejorar la calidad de la medida. Pese a esa reducción del error, puede compensar utilizar la aproximación de la función por una recta puesto que se obtiene un sistema lineal y la calidad de las medidas varía escasamente.

A continuación, se calcula el máximo error absoluto que se obtiene entre el valor de energía de cada punto y el valor del ajuste por la recta anteriormente descrita (figura 5.7). Esto permite definir la máxima variación de energía que se puede producir al utilizar el ajuste de los puntos por la recta descrita.

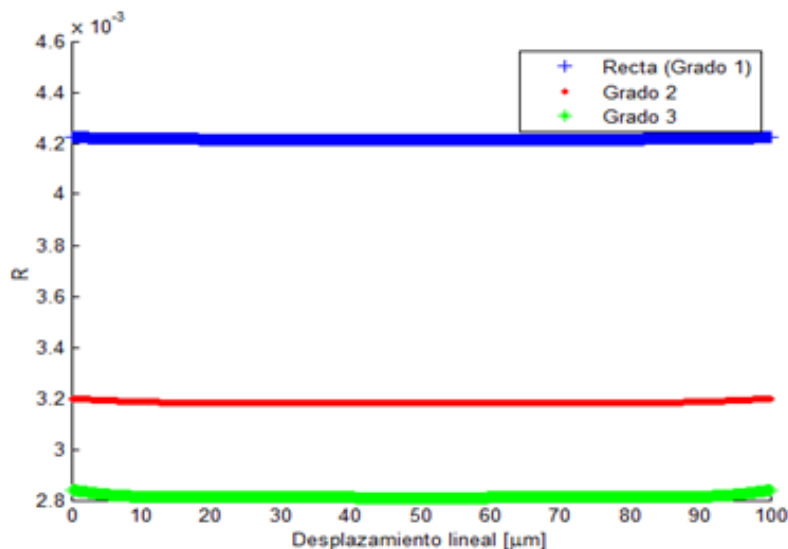


Figura 5.6 Error residual de las aproximaciones

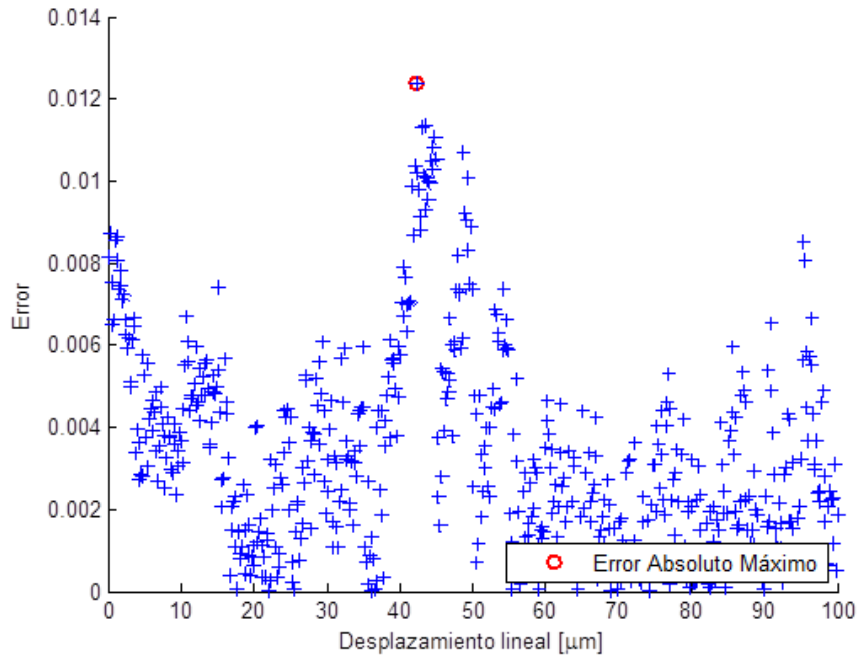


Figura 5.7 Representación de los errores absolutos en Energía

La tabla 5.2 trata de representar los errores absolutos máximos que se cometen en el ajuste de los puntos. Posteriormente, se analizará el error cometido en las medidas del desplazamiento al pasar de la ecuación inversa a la ecuación directa.

Tabla 5.2 Error máximo de cada ajuste

Polinomio	Error Máximo Absoluto
Grado 1	0,0124
Grado 2	0,0095
Grado 3	0,0087

Si se propaga el error absoluto del sistema, se obtiene:

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial E} \Delta E$$

$$\Delta x = 1582,6 \cdot 0,0124 = 19,6 \mu m$$

El error máximo que se obtiene es muy elevado lo que indica que el sistema no es muy exacto en la medida del desplazamiento y debería mejorarse su respuesta. Existen varias condiciones que propician que el error calculado sea tan elevado. Por una parte, se cita el error debido al ruido modal que presenta el sistema, y que se estudiará en el apartado siguiente. Básicamente, los agentes externos como cambio de temperatura o vibraciones en el banco de medidas afectan a la fibra óptica del sistema puesto que es muy sensible. Estos efectos provocan que el patrón de speckle no sea estático totalmente y esté fluctuando constantemente.

Por otra parte, existe el error sistemático introducido por el sistema al realizar el ajuste por recta, puesto que si se observa la figura 5.4 correspondiente a la energía, realmente presenta tres tramos rectos con pendientes distintas cada uno de ellos, por lo que si se realizase una ajuste más fino por tramos se podría obtener un mejor resultado y el error se vería claramente reducido. La desventaja de ello, es la pérdida de linealidad del sistema, provocando que sea más complejo. Un tercer error es el introducido al realizar el desplazamiento en la fibra, ya que, éste se efectúa de forma manual, lo que conlleva a generar un error adicional en las medidas.

Como resultado final, se ilustra en la figura 5.8 la respuesta del sistema de dos videos capturados con respecto a la respuesta ideal. Para la curva ajustada se ha promediado el valor el valor de la energía de las 30 imágenes tomadas para cada desplazamiento, reduciendo de esta manera el error del sistema.

Se puede comprobar cómo es posible relacionar el desplazamiento realizado en la fibra óptica con las variaciones que sufren los patrones de speckle al calcular la energía de la matriz de coocurrencia. Los primeros desplazamientos efectuados presentan el mayor rango de error debido a que la energía presenta una pendiente inferior a la pendiente de la recta calculada en el ajuste. Sin embargo, para los últimos puntos donde las pendientes coinciden, los puntos se ajustan mejor valor del desplazamiento que sufre la fibra.

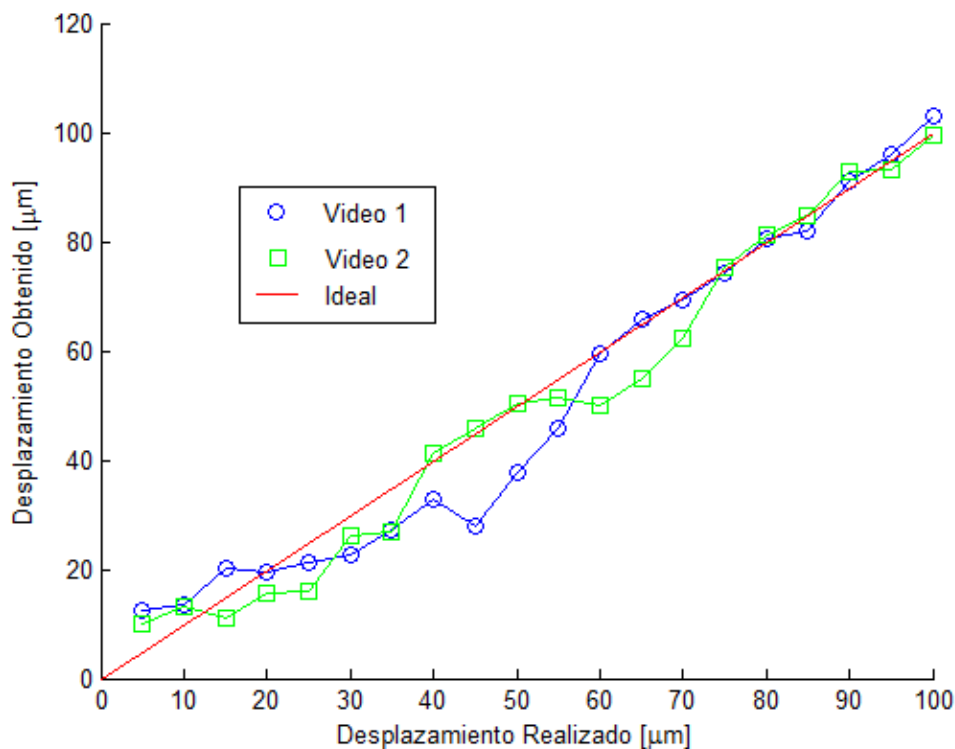


Figura 5.8 Respuesta final del sistema de desplazamiento

Como se describió anteriormente, existen numerosos factores y errores que repercuten negativamente en el sistema diseñado. Pese a que no es objeto de este proyecto el diseño de un sensor de desplazamiento altamente exacto y preciso, no se profundiza en cómo mejorar el sistema, pero si es destacable realizar un pequeño estudio del ruido modal que se obtiene en los patrones de speckle. Este ruido produce que el speckle esté fluctuando, es decir, los granos que conforman el patrón no son estáticos sino que están moviéndose a lo largo del tiempo. Esta variación es totalmente aleatoria y su magnitud depende de la magnitud de los fenómenos que afecten a la fibra. Generalmente, las fluctuaciones de ruido son bastante inferiores a las fluctuaciones que se obtienen al realizar, por ejemplo, un desplazamiento.

Se procede por tanto, a capturar un vídeo de 30 segundos de duración en donde no se aplica ningún tipo de desplazamiento en la fibra óptica, por lo que únicamente se verá afectada por las perturbaciones externas. Primeramente, se ilustra en la figura 5.9 la energía de la matriz de coocurrencia obtenida de los patrones de speckle que son afectados por el ruido.

Se puede comprobar que la energía oscila entre un cierto rango, que provoca una dispersión de valores, que afecta negativamente al sistema, ya que las medidas serán poco precisas. Esto se puede comprobar en la figura 5.10, donde se han introducido las variaciones de energía en el sistema compuesto por la recta del ajuste anterior, para evidenciar las fluctuaciones que provoca dicho ruido en el desplazamiento.

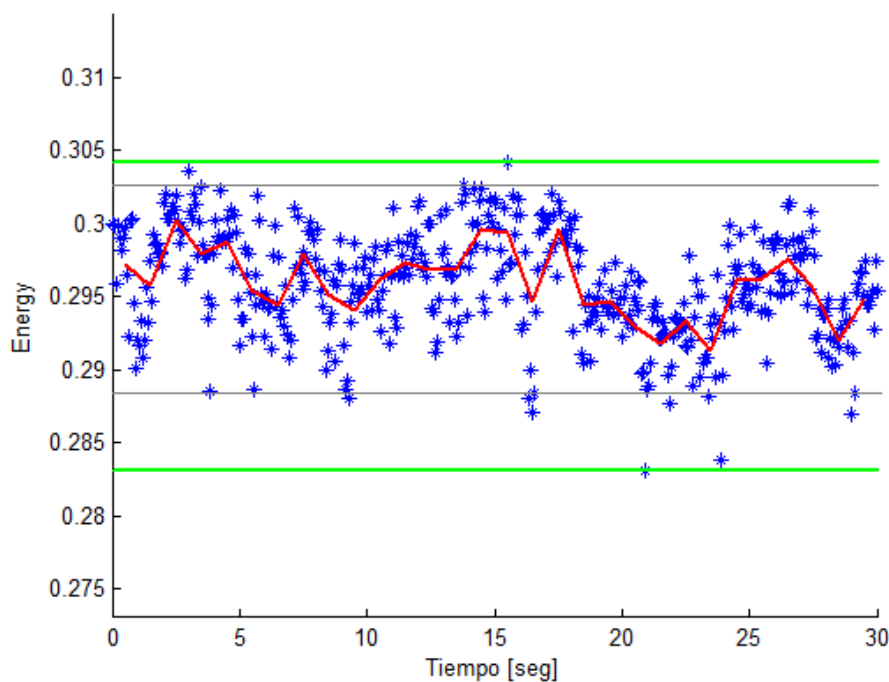


Figura 5.9 Evolución de la Energía del ruido

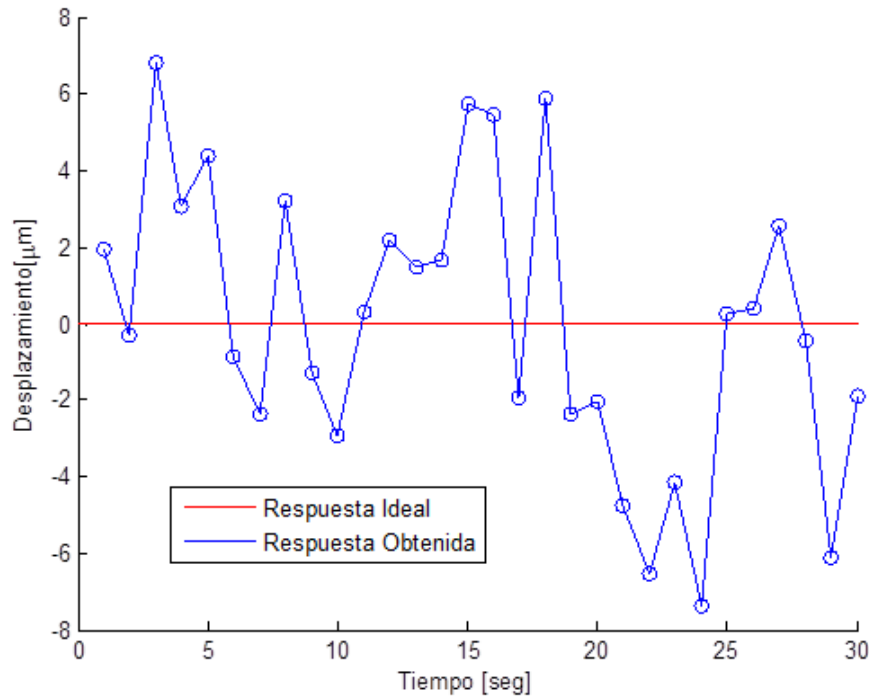


Figura 5.10 Repercusión del ruido en el sistema

El error modal es un factor que repercute negativamente en el sistema de medida, puesto que la fibra al ser muy sensible capta otros fenómenos que interfieren en el patrón de speckle y por consiguiente en la medida. Las dos soluciones más sencillas para reducir su efecto son las siguientes:

- Desarrollar un sistema menos sensible al ruido.
- Promediar las muestras.

La primera opción consiste en mejorar el aislamiento del sistema para que presente un comportamiento menos sensible al ruido. Para ello, se puede mejorar el montaje, ajustando mejor las fijaciones de todos los elementos, así como de los tramos de fibra. También es conveniente aislar las partes descubiertas de la fibra por donde pueda incidir luz externa y alterar el comportamiento de la luz que viaja por el interior. Por último, se puede reemplazar la fibra utilizada por otra con menor sensibilidad. Posteriormente, se analizará el comportamiento de varias fibras frente al ruido para aclarar estos conceptos.

La segunda opción, consiste en promediar varias muestras para obtener un valor. Cuando se realizan las medidas, para cada desplazamiento se toman treinta imágenes seguidas, y después se promedia la energía de dicho conjunto para obtener un valor de energía medio que permita obtener un desplazamiento medio, que se acerca al desplazamiento ideal que sufre la fibra. Otra alternativa, consiste en capturar un conjunto de imágenes en varios instantes temporales para un cierto desplazamiento, dependiendo de la naturaleza del ruido modal podría mejorar la precisión de las medidas.

5.3. Resultados con fibra de 250 μm

En este otro apartado, se analiza el comportamiento de los patrones de speckle para una fibra multimodo con 250 μm de diámetro del núcleo, aunque realmente la fibra óptica utilizada presenta un núcleo un poco inferior de 240 μm . Para realizar las medidas se lleva a cabo el mismo montaje que en la sección anterior. La cámara de captura se ajusta para una configuración en modo manual que permita obtener una buena calidad del patrón de speckle generado por la fibra. Es importante fijar las propiedades de forma manual, para que el contraste y la exposición no se modifiquen mientras se está capturando el vídeo con las medidas aplicadas.

Resulta lógico pensar que al reducirse el diámetro del núcleo de 1 mm a solo 250 μm , el número de modos de propagación de la luz se reduce consecuentemente. Esta reducción se puede apreciar en la ecuación (47) correspondiente a la frecuencia normalizada y a la ecuación (48) que define el número de modos. Si se observa la tabla 4.1 expuesta en el capítulo anterior, se puede cuantificar dicha reducción. No obstante, la cantidad de modos de propagación dentro de la fibra sigue siendo un valor muy elevado y por ello, el tamaño medio de los granos de speckle sigue siendo minúsculo. Debido al gran número de modos y al pequeño tamaño de los granos, la fibra sigue siendo muy sensible frente a perturbaciones, aunque menor que la fibra de 1 mm .

También presenta la ventaja de que se decrementa la sensibilidad a factores externos, como los ya mencionados, temperatura o vibraciones externas captadas en cualquier punto del montaje. Esto permite implementar un buen sistema frente a lo que ruido modal se refiere, ya que, se reduce su efecto y además se sigue manteniendo una buena sensibilidad para captar perturbaciones más elevadas como es el desplazamiento.

Una vez argumentado el procedimiento de medida, se procede a exponer los resultados obtenidos para intentar caracterizar de manera más profunda el sistema realizado para las medidas.

Primeramente, se analiza la respuesta que aportan los tres descriptores utilizados en la matriz de coocurrencia, lo que permite definir el comportamiento que siguen las imágenes capturadas con los desplazamientos realizados en la fibra. Dichos desplazamientos, se realizan con un paso de 5 μm .

En primera instancia, se ilustra en la figura 5.11 un ejemplo de un patrón de speckle obtenido y procesado a escala de grises junto a su histograma correspondiente.

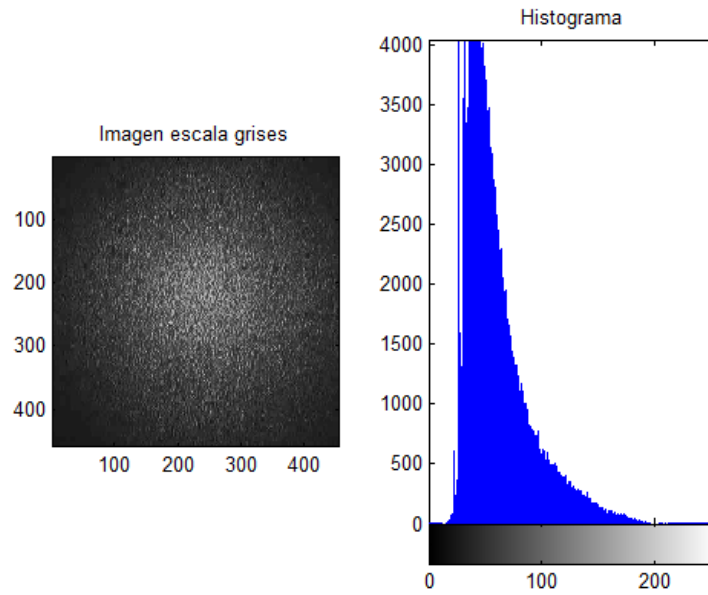


Figura 5.11 Patrón de speckle de la fibra e histograma

Seguidamente, se continúa con la representación de los tres descriptores desarrollados: contraste, correlación y energía. De los tres descriptores se toma el que mejor comportamiento frente al desplazamiento aporta, buscando una respuesta lineal del sistema.

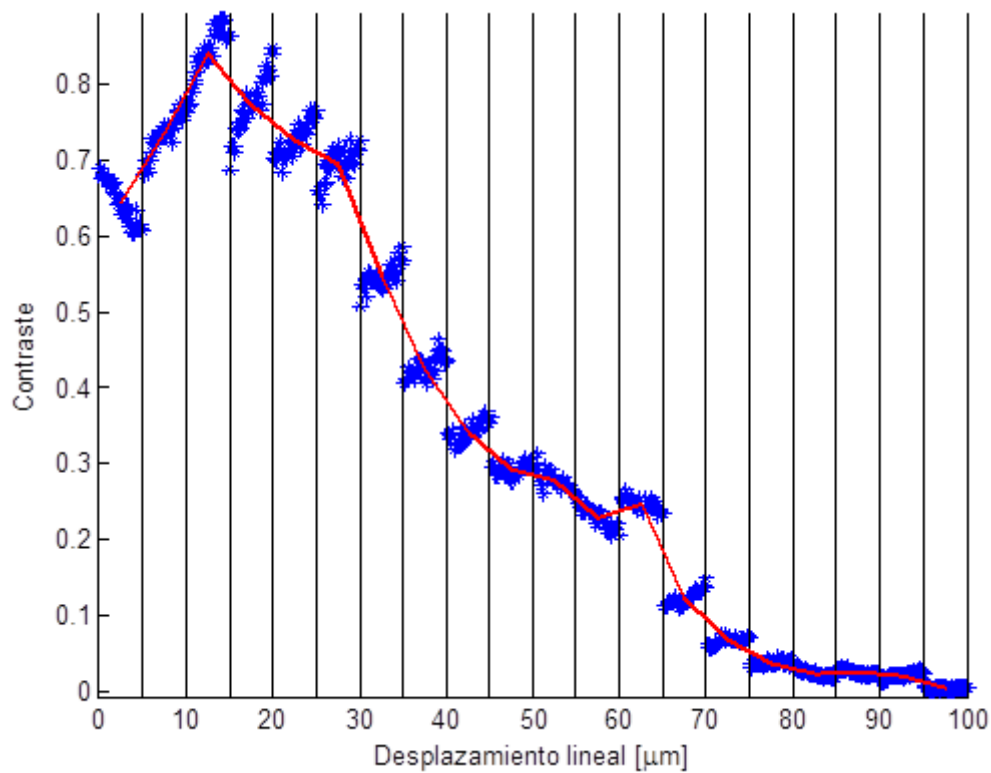


Figura 5.12 Evolución del contraste de la matriz

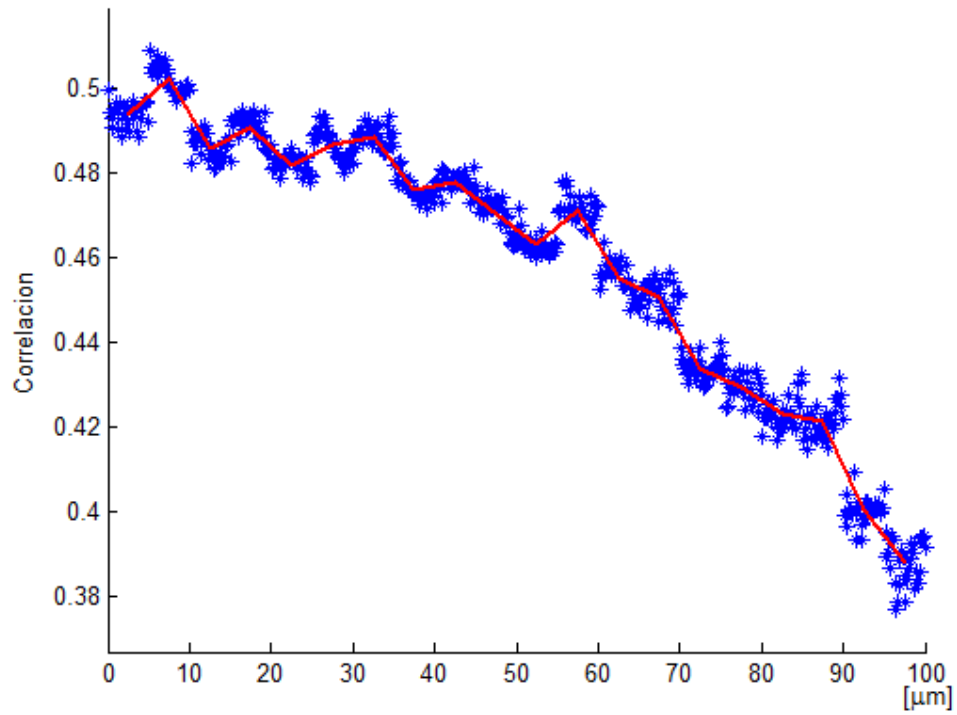


Figura 5.13 Evolución de la correlación de la matriz

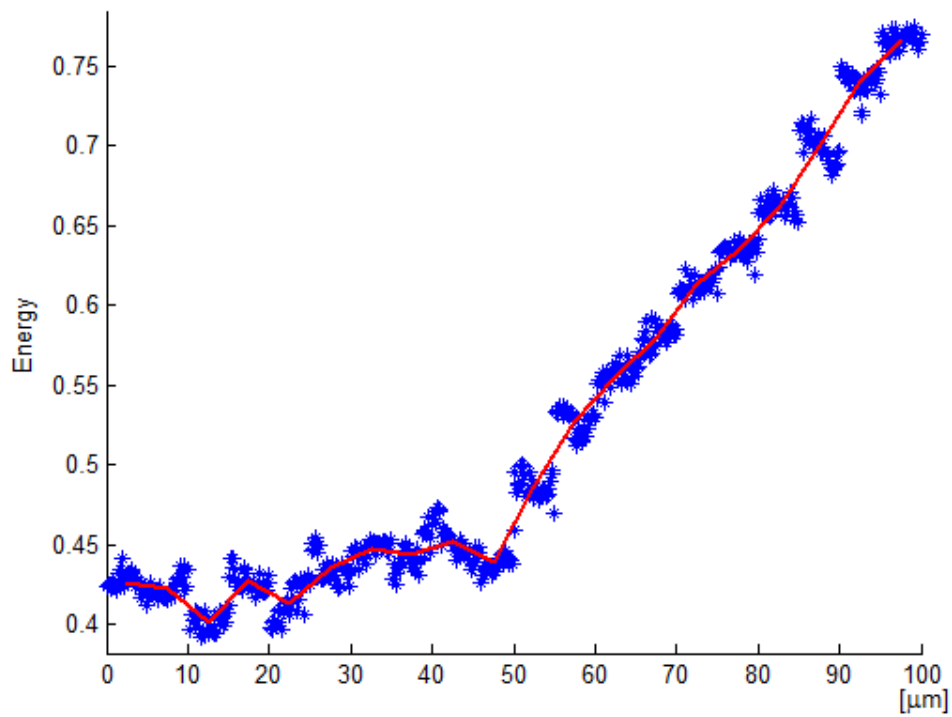


Figura 5.14 Evolución de la energía de la matriz

En el caso del contraste, se obtiene una respuesta que tiende a decrecer según se va incrementado el desplazamiento sobre la fibra. Pese a ello, tiene un comportamiento muy poco lineal por lo que no es el descriptor más adecuado para nuestro sistema. Si se analiza la correlación, se obtiene una curva decreciente a medida que el desplazamiento aumenta pero presenta poca linealidad por lo que no es un buen descriptor para el sistema implementado. La figura 5.14 corresponde a la energía de la matriz de coocurrencia y en ella, dicha energía tiende a crecer a medida que se aumenta el desplazamiento en la fibra. Presenta dos tramos casi lineales, en el que el segundo ofrece la mejor respuesta.

Profundizando en la gráfica de la energía, hay que mencionar que la poca sensibilidad que presenta el primer tramo, con una pendiente poco pronunciada, se debe principalmente al montaje del dispositivo encargado de realizar el desplazamiento. Para empezar las medidas sin ninguna perturbación introducida por el desplazador, por ejemplo, el mero peso provoca que la placa dentada ejerza una fuerza sobre la fibra óptica provocando que se produzca una tensión entre las placas, y con ellos un pequeño desplazamiento en la fibra.

Para evitar dicho efecto, se ha optado por situar la fibra entre las placas un poco suelta, dándole un grado de elasticidad, sin que esté inicialmente tensa y se propicie una perturbación indeseada sobre ella. Por ello, se obtiene una respuesta que primeramente es poco sensible al desplazamiento. Hasta que la fibra no está lo bastante tensa entre los dientes que se apoya, presenta poca sensibilidad a la perturbación aplicada. Además, esto aporta la ventaja de poder buscar el rango de sensibilidad lineal que presenta el sistema de medida desarrollado.

En la figura 5.15, se ilustra el rango dinámico que presenta la fibra de $250\ \mu\text{m}$ realizando desplazamientos con incrementos de $5\ \mu\text{m}$ cada uno. Para ello, por motivos de limitación de tamaño y de memoria se han realizado dos vídeos que posteriormente se han unido para conformar la gráfica final que se muestra.

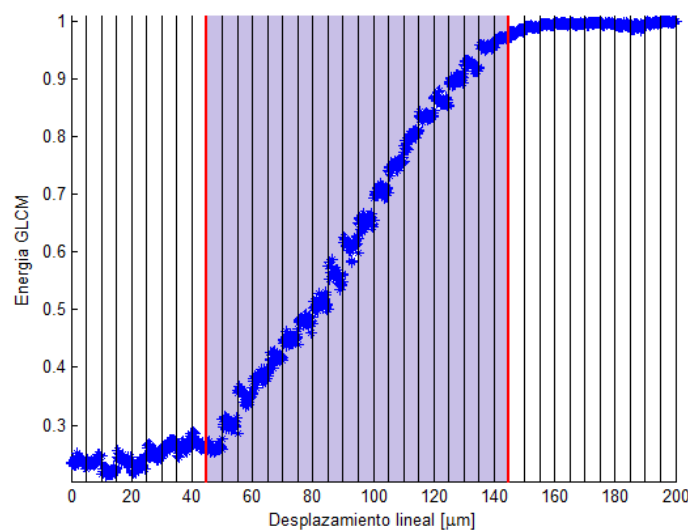


Figura 5.15 Rango de linealidad de la fibra

El rango fijado trata de limitar la zona lineal de la respuesta ofrecida por el sistema. Pese a que esta zona es definida por el usuario, se trata de definir de forma razonada y coherente. En la figura 5.15 obtenida, se ha limitado la zona lineal entre las dos líneas rojas. Por lo tanto, se obtiene un rango dinámico de aproximadamente $100 \mu m = (145 \mu m - 45 \mu m)$.

Como se describió anteriormente, el margen inferior está limitado por la poca sensibilidad inicial que presenta el sistema al colocar la fibra poco tensa. En cuanto la fibra se empieza a tensar, se vuelve muy sensible a la presión que ejercen los dientes sobre ella y consecuentemente al desplazamiento realizado.

Por otra parte, el límite superior se debe a la elongación longitudinal de la fibra. Mientras se aumenta el desplazamiento, la elongación longitudinal también aumenta hasta que llega un momento en que se sobrepasa el valor máximo de la elongación permitida y con ello la fibra llega a deformarse. Este hecho provoca una deformación permanente en donde la luz es atenuada fuertemente y la fibra pierde su sensibilidad.

También se ha optado por reducir el paso de $5 \mu m$ a tan solo $2 \mu m$ para comprobar la precisión del sistema. Esto consiste en analizar si todos los puntos adoptan el mismo valor, o un valor muy parecido, lo que indica que el sistema está poco influenciado por el ruido modal causado por perturbaciones ajenas al desplazamiento.

Al igual que en el caso anterior, se calcula la matriz de coocurrencia para la secuencia de imágenes capturadas y se representan los tres descriptores con los que se está trabajando en función del desplazamiento realizado en la fibra.

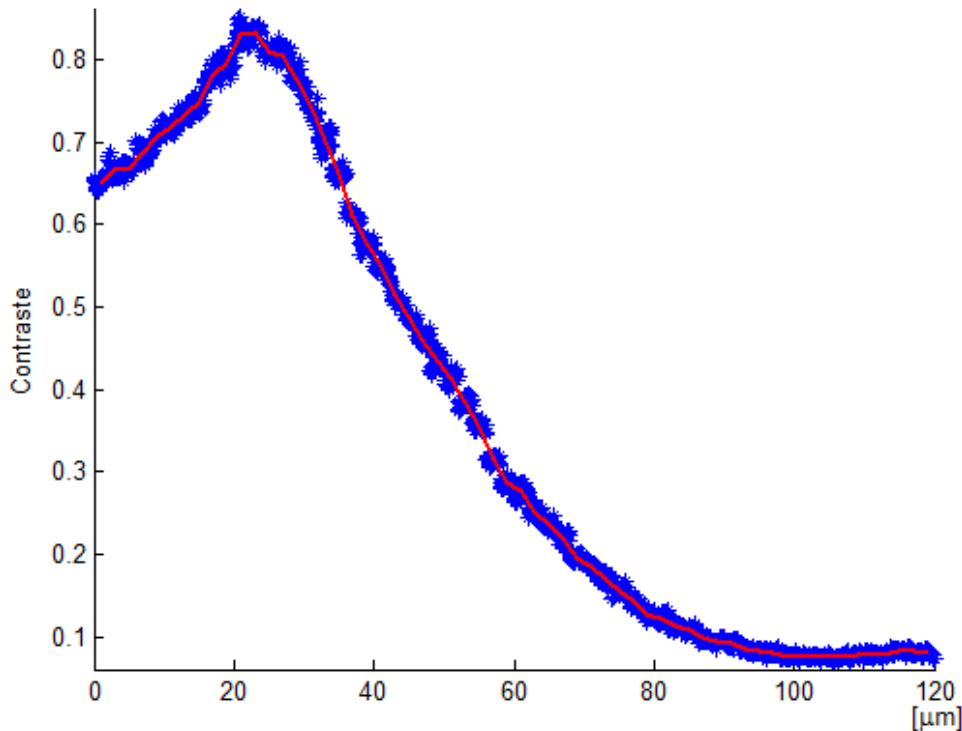


Figura 5.16 Evolución del contraste ($2 \mu m$ de paso)

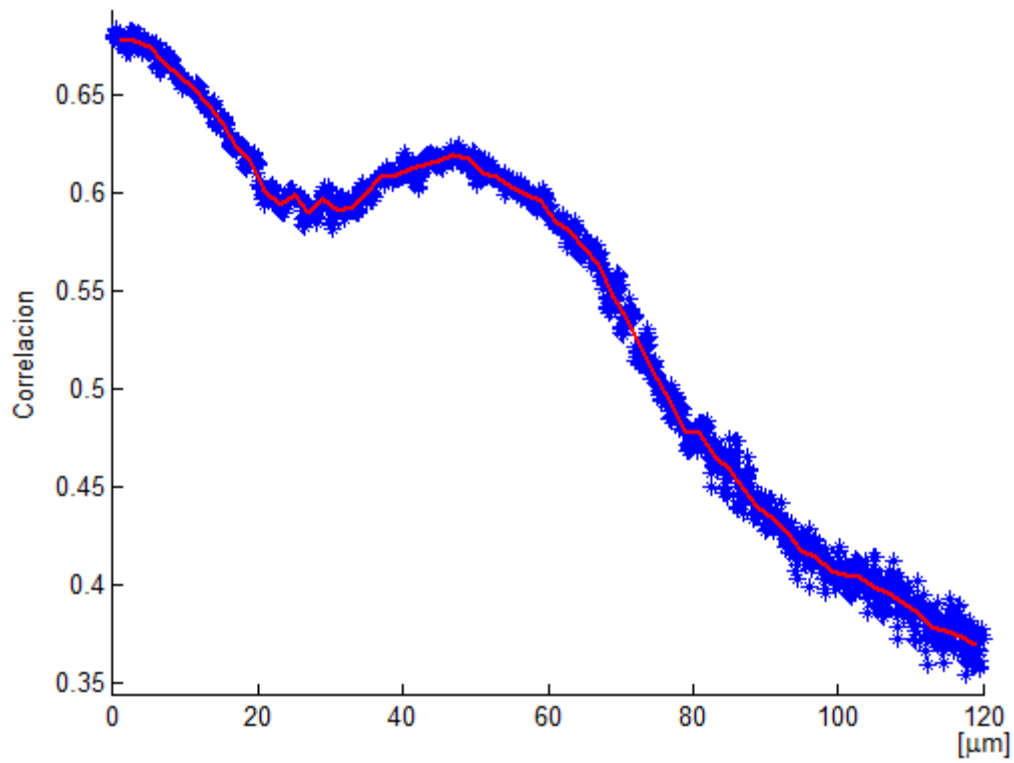


Figura 5.17 Evolución de la correlación (2μm de paso)

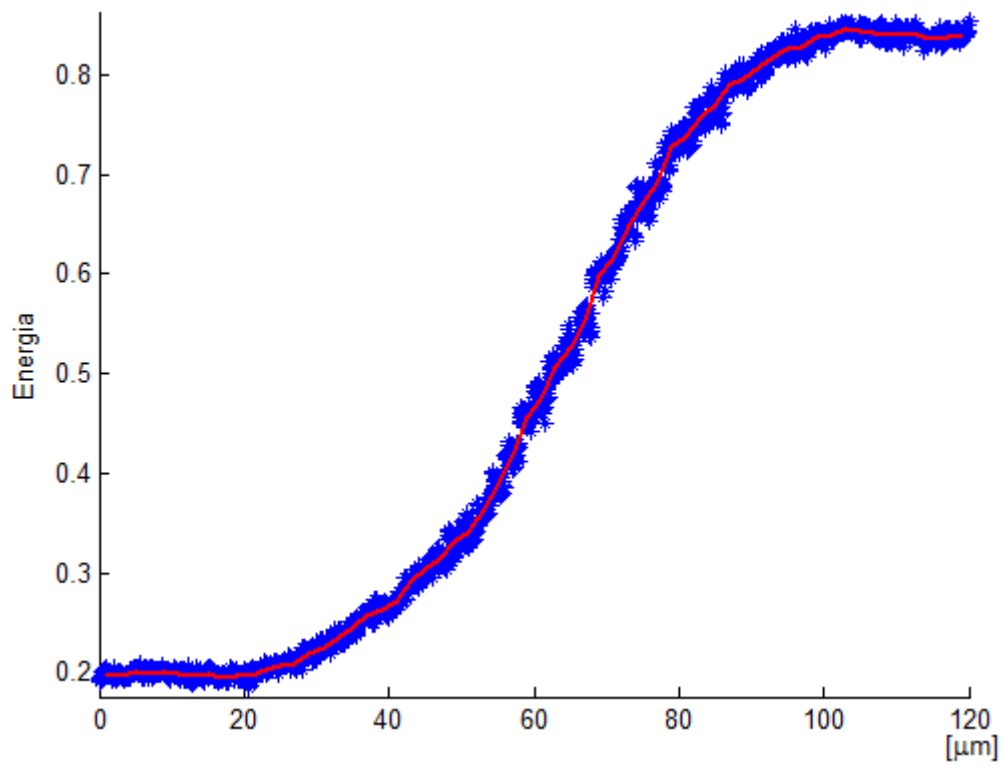


Figura 5.18 Evolución de la energía (2μm de paso)

De los tres descriptores, el que mejor respuesta ofrece ante el desplazamiento realizado resulta ser la energía. Aunque el contraste y la correlación presentan algunos tramos bastante lineales que decrecen a medida que aumenta el desplazamiento resulta más complicado encontrar un buen ajuste de la curva mediante un polinomio. Sin embargo, la energía permite definir una zona bastante amplia donde su respuesta es lineal.

Por esta razón, se representa seguidamente la figura 5.19, en donde, se ha fijado un límite inferior y un límite superior para la zona lineal contenida en el rectángulo de color azul. Dentro de esta zona, se puede realizar un buen ajuste de la curva que conforman los puntos con una recta mediante la técnica de mínimos cuadrados.

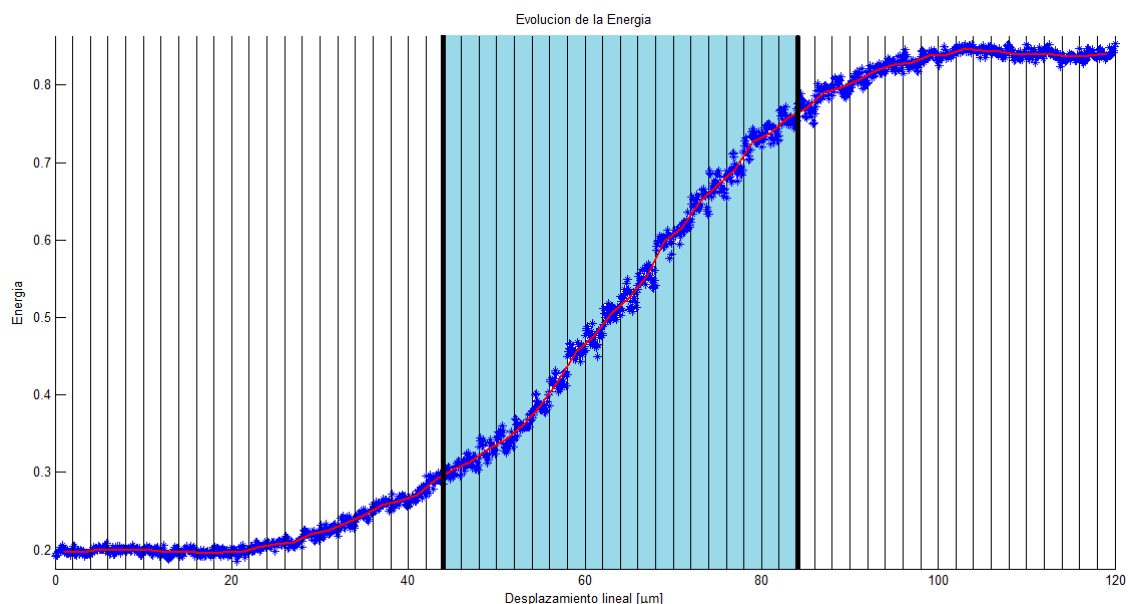


Figura 5.19 Rango lineal de la energía

Observando la gráfica, se puede indicar que el rango dinámico de sistema para este ejemplo, se ha definido dentro de la zona azul donde mayor linealidad presenta la respuesta. En este caso, se obtiene un rango para medidas de desplazamiento de $40 \mu m = (84 \mu m - 44 \mu m)$. Es un valor bastante menor que los casos analizados anteriormente, no obstante, se puede ampliar el rango hasta un valor máximo aproximado de $80 \mu m = (100 \mu m - 20 \mu m)$ pero el error que se introduce en el ajuste de la curva y por consecuencia en la medida aumenta considerablemente. Esto provoca que la exactitud del sistema se vea ampliamente reducida y que se deban fijar unas pautas para encontrar un buen compromiso entre rango dinámico, exactitud y precisión de las medidas.

Por consiguiente, se calcula la recta que mejor se ajusta a los puntos definidos para la energía de la matriz de coocurrencia y se obtienen sus coeficientes para posteriormente trabajar con ellos. Una vez realizado el cálculo se procede a representar el ajuste de la curva mediante una recta como se puede observar en la figura 5.20.

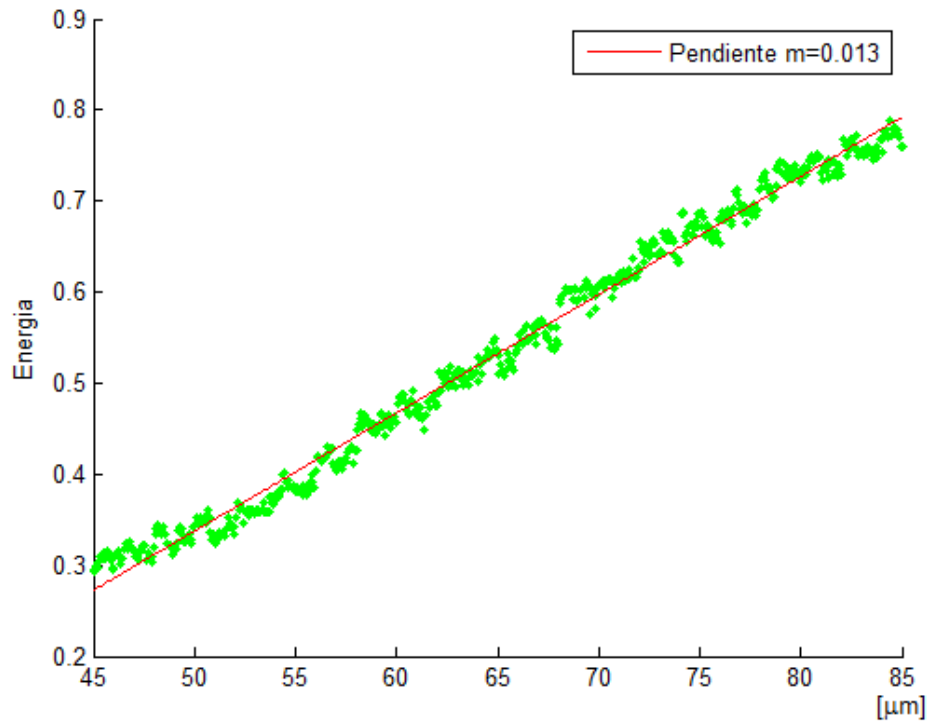


Figura 5.20 Ajuste de los puntos mediante una recta

Para un rango de $40 \mu m$ se consigue un buen ajuste de los puntos. La ecuación de la recta calculada se expresa en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Ecuación de la recta del ajuste

Polinomio	Ecuación
Recta	$E = 0,0128X + 0,2995$

También es importante calcular el error absoluto que se comente en el ajuste. Este error se define como la diferencia entre el valor de energía de la matriz de coocurrencia de cada imagen y el valor de energía que se obtiene en la recta ajustada.

El error absoluto máximo, se tomará como la máxima desviación que puede sufrir la energía, y que al propagarse a la salida permite definir la máxima desviación que sufre la medida del desplazamiento.

Si se propaga el error absoluto del sistema se obtiene:

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial E} \Delta E$$

$$\Delta x = 76,92 \cdot 0,0381 = 2,93 \mu m$$

Se puede observar que el error máximo que se obtiene en la medida del desplazamiento resulta un poco elevado.

Al igual que en el resto de casos anteriores, este error esta propiciado principalmente por el ruido modal que presenta el sistema al estar poco aislado y a la poca precisión con que se realizan los desplazamientos lineales sobre la fibra, puesto que, se manipulan de forma totalmente manual.

Otro paso importante es promediar el valor de energía de las muestras, si se recuerda la configuración, son 30 imágenes por cada desplazamiento lo que permite reducir el efecto del ruido modal y por consiguiente el error máximo en las medidas también decrece. Esto se puede comprobar en la tabla 5.4 expuesta a continuación.

Tabla 5.4 Errores a la entrada y salida del sistema

Desviación máxima	Energía	Desplazamiento [μm]
Sin promediar	0,0381	2,93
Promediando	0,0257	1,98

Por último, se finaliza el análisis con la representación de la respuesta ideal que debería presentar el sistema frente a la respuesta real que se obtiene al ajustar los puntos por la recta anteriormente descrita. En la figura 5.21, se ilustra dicha gráfica donde se puede observar los resultados para las medidas de desplazamiento en el sistema diseñado.

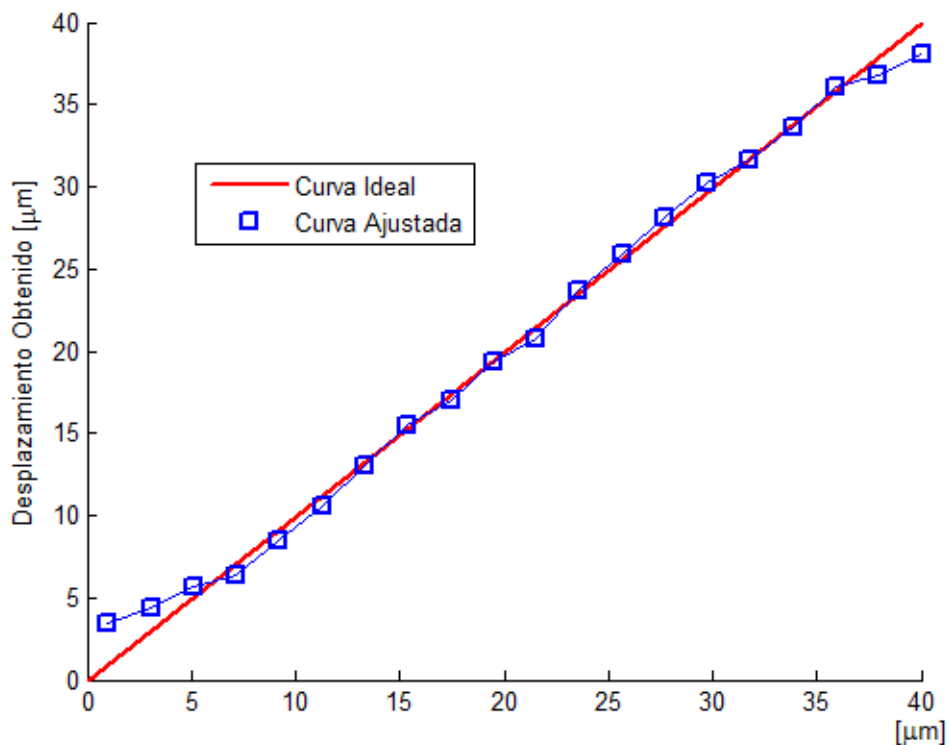


Figura 5.21 Respuesta final del sistema (Fibra de 250 μm)

La anterior gráfica trata de ilustrar el desplazamiento que se aplica en la fibra óptica correspondiente al eje de abscisas, mientras que en el eje de ordenadas se dibuja el valor que realmente proporciona el sistema.

Para dicho propósito, tras realizar el ajuste de la curva por una recta, se traslada el punto inicial del límite inferior al origen de coordenadas, es decir, se toma como referencia o estado inicial del sistema implementado. Para generar la gráfica, se sustituyen los valores de energía de la matriz de coocurrencia que se han calculado para la zona lineal y posteriormente, se introducen en la ecuación directa del sistema, definida por:

$$d[\mu m] = \frac{E}{0,0131} = 76,16E$$

Se pueden realizar muchas modificaciones dentro del sistema desarrollado como puede ser ampliar el rango dinámico del sistema, o mejorar la precisión y exactitud de las medidas entre otras. Si se desea construir un buen sensor para este tipo de desplazamientos lineales y micrométricos resultaría adecuado realizar un análisis para mejorar dichas características del sistema.

Por último, se incluye un pequeño análisis del ruido modal para la fibra óptica de $250 \mu m$ utilizada en el sistema de medida. En el estudio, se pretende evaluar cómo repercute el ruido modal en el sistema y por consiguiente, en la precisión de las medidas de desplazamiento.

La figura 5.22 representa una nube de puntos al capturar una secuencia de 40 segundos a razón de 15 imágenes por segundo y que permite definir los valores máximo y mínimo en los que oscila la energía.

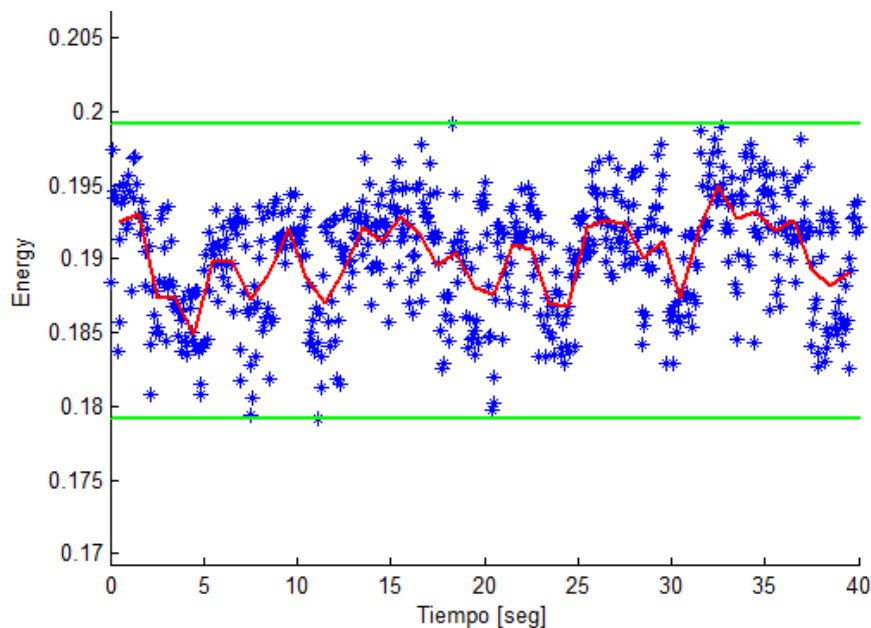


Figura 5.22 Variación del ruido de la fibra

En la figura 5.22 se han dibujado los límites en los que se concentran las variaciones de energía. Este efecto provoca que las medidas estén fluctuando constantemente dentro de un determinado margen. Como ya se comentó con anterioridad, resulta adecuado promediar las medidas para obtener un valor medio próximo al valor real y de esta manera reducir el efecto del ruido.

Finalmente, se representan las fluctuaciones que sufren las medidas de desplazamiento del sistema provocadas por la dispersión de energía a causa del ruido modal en la figura 5.23.

Al introducir las fluctuaciones de energía dentro de la ecuación directa del sistema, calculada como una recta en el apartado anterior, se pueden calcular los desplazamientos que pueden llegar a provocar el ruido modal. Este fenómeno repercute negativamente en las medidas lo que provoca una pérdida de precisión en los desplazamientos. Pese a esto, presenta una sensibilidad frente al ruido mucho menor que la del sistema implementado con fibra óptica de 1 mm de diámetro de núcleo.

En el siguiente capítulo, se realizará una comparativa sobre las características de las tres fibras utilizadas en la medida de desplazamientos micrométricos y se expone la mejor solución.

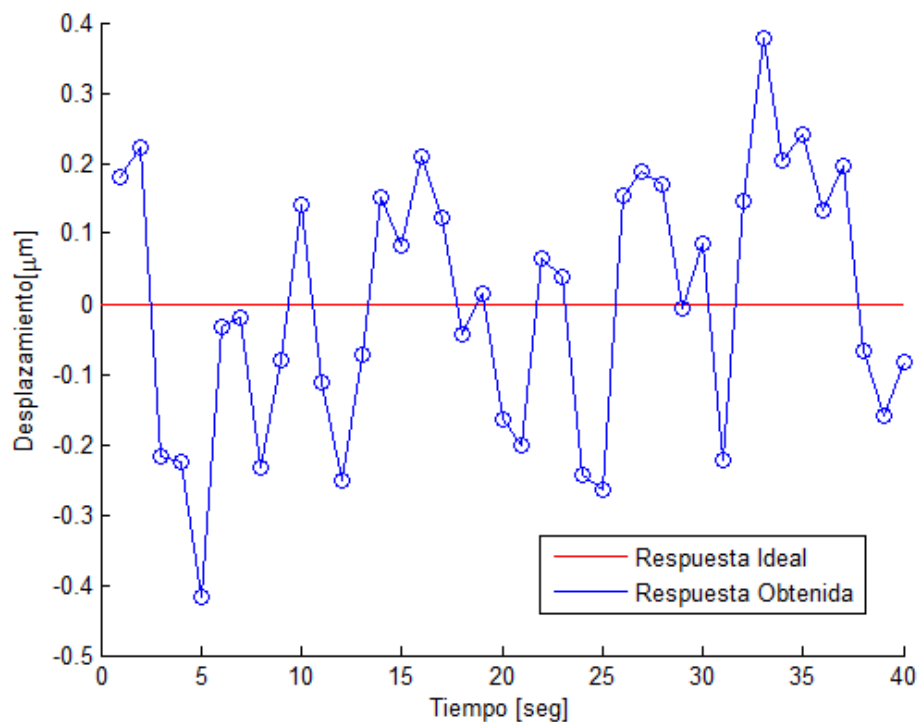


Figura 5.23 Repercusión del ruido en el sistema

5.4. Resultados con fibra de 50 μm

A continuación, se procede a analizar el comportamiento de la fibra óptica con 50 μm de diámetro de núcleo. Para ello, se vuelven a fijar las mismas características de captura que el apartado anterior, por lo tanto, se utiliza la misma configuración de las propiedades de la cámara. Por otra parte, el montaje seguido se sigue manteniendo a excepción, de la fibra óptica, que es el único elemento que se ve modificado.

Es de esperar que el sistema responda con menor sensibilidad puesto que al reducirse el diámetro del núcleo conlleva a un decremento del número de modos de la fibra provocando que los granos de speckle aumenten de tamaño, pero a la vez, disminuyan su cantidad en gran medida.

Una vez argumentado el diseño del montaje que se emplea y el resultado que se espera obtener se puede proceder a representar los resultados obtenidos.

Primeramente, se ilustra en la siguiente figura 5.24 el patrón de speckle obtenido de una imagen en escala de grises y su correspondiente histograma.

A través del análisis de los patrones de speckle como el mostrado la anterior ilustración, se calcula la matriz de coocurrencia para la dirección predeterminada [0,1]. Posteriormente, se prosigue con el cálculo de sus descriptores básicos y la representación de cada uno de ellos.

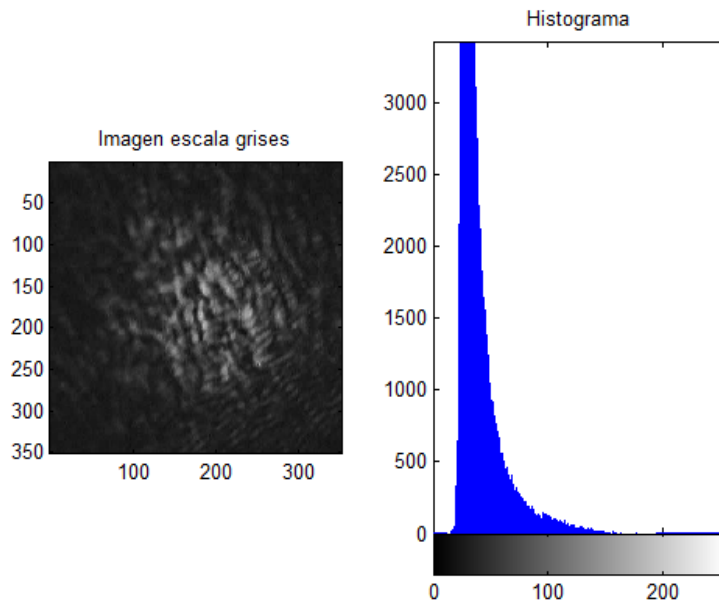


Figura 5.24 Patrón de speckle fibra de 50 μm e histograma

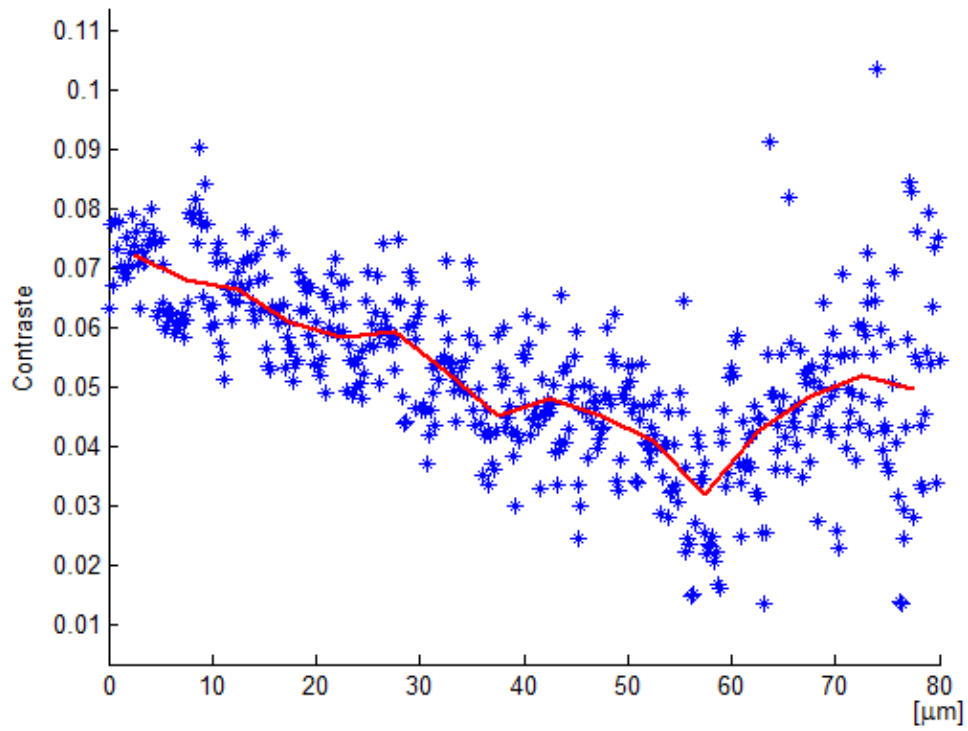


Figura 5.25 Contraste de la matriz (fibra 50 μm)

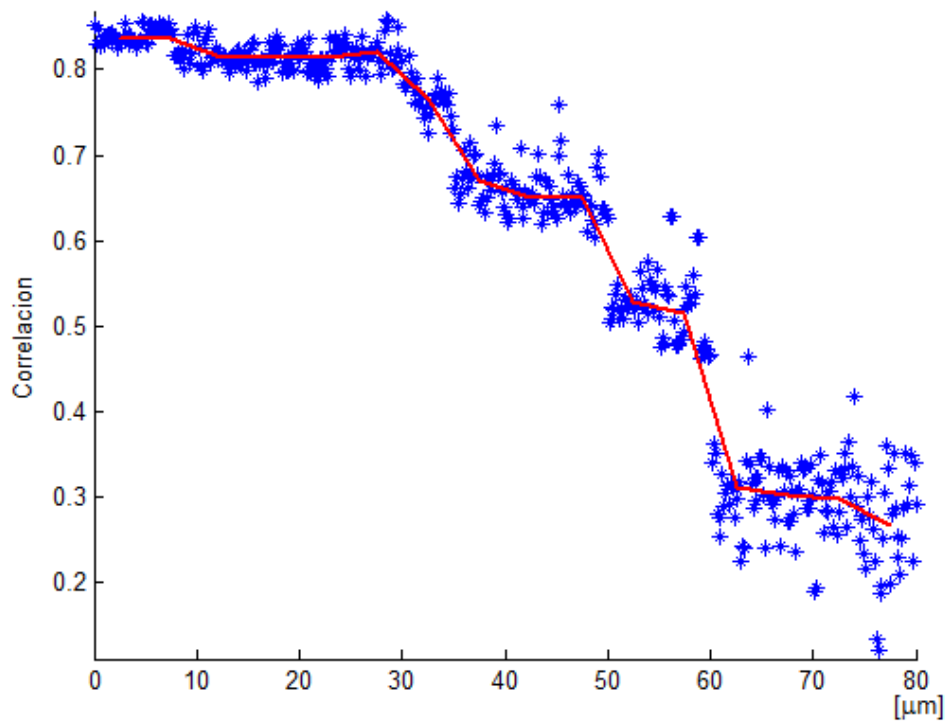


Figura 5.26 Correlación de la matriz (fibra 50 μm)

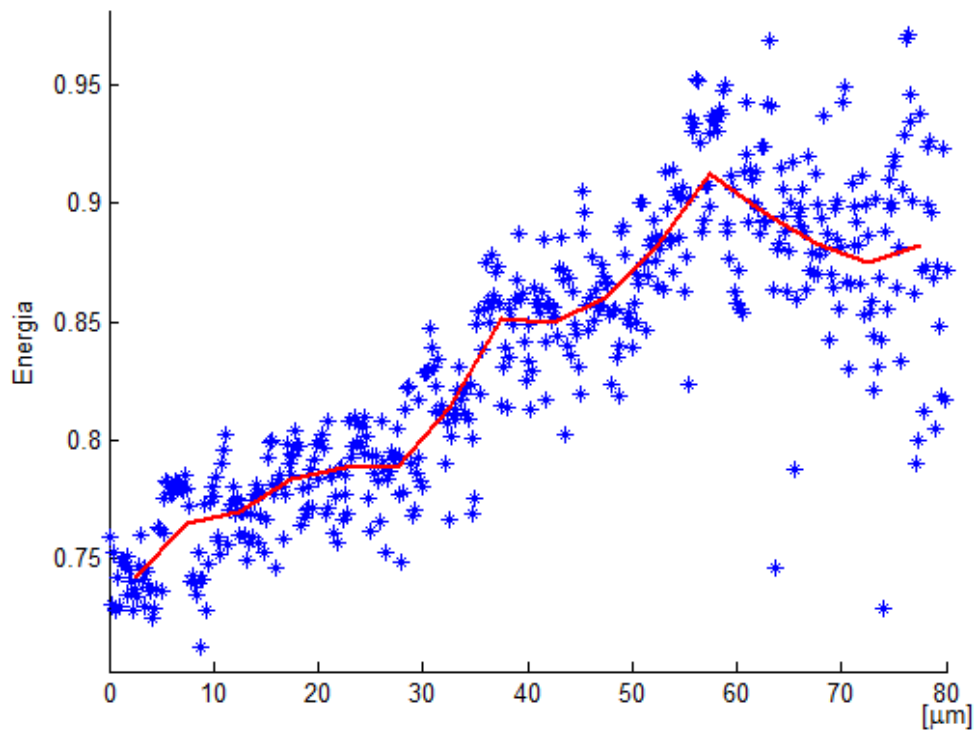


Figura 5.27 Energía de la matriz (fibra 50 μm)

Observando las figuras 5.25, 5.26 y 5.27, se puede observar como el comportamiento de la fibra de 50 μm resulta parecido al resto de fibras analizadas. El contraste y la correlación tienden a decrecer con cierta linealidad a medida que se aumenta el desplazamiento aplicado. De igual modo, la energía tiende a incrementarse según se aplica un desplazamiento cada vez más elevado. Al igual que en casos anteriores, el descriptor que mejor comportamiento presenta es la energía, puesto que ofrece una mayor propiedad de linealidad.

En cuanto al rango lineal que presenta el sistema con este tipo de fibra oscila alrededor de 50 – 60 μm , debido principalmente a la elongación longitudinal que presenta esta fibra óptica. Al ser una fibra bastante fina, al igual que la fibra de 250 μm , el rango dinámico se reduce considerablemente, lo que no sucedía con la fibra de 1 mm , puesto que presenta un diámetro mucho más gordo.

Consecuentemente con lo descrito, se procede a representar la aproximación de los puntos obtenidos para la energía de la matriz de coocurrencia, mediante el ajuste de curva de un polinomio de grado 1, correspondiente a una recta. Dicho ajuste se realiza mediante la técnica de mínimo cuadrados y permite adoptar una respuesta lineal del sistema desarrollado.

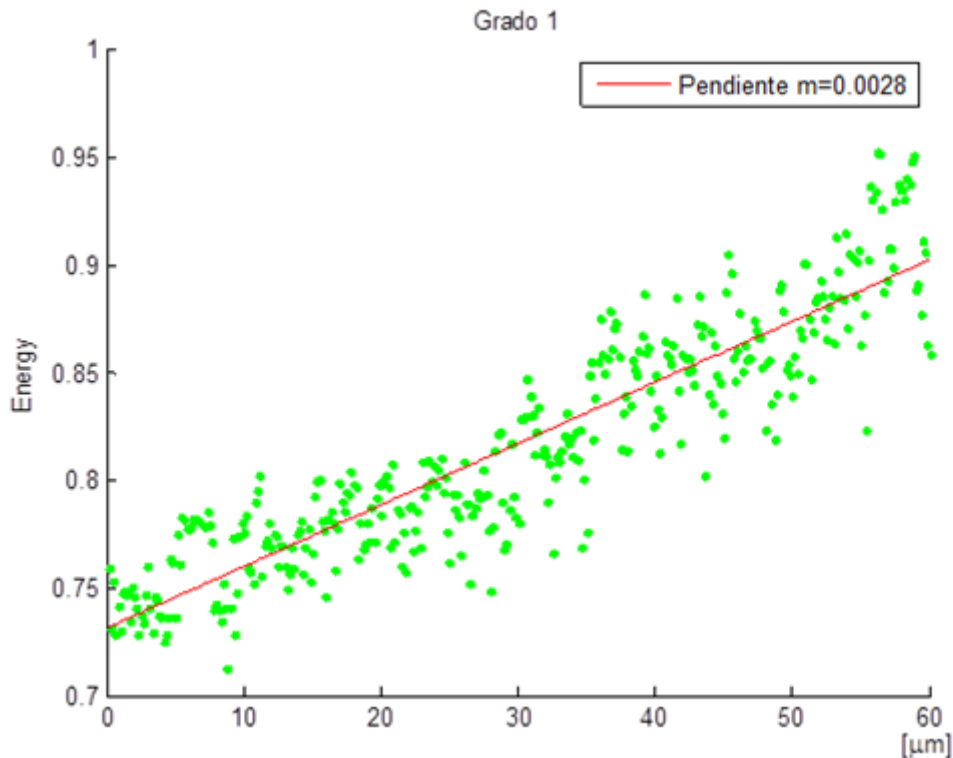


Figura 5.28 Ajuste de los puntos por una recta

Analizando la el comportamiento de la gráfica de la figura 5.28 se puede deducir que los puntos tienden a aumentar de energía a medida que se incrementa el desplazamiento, pero presentan el inconveniente de que se produce una gran dispersión, causada principalmente por el ruido modal que afecta al sistema. Por consiguiente, se define la expresión de la recta que mejor se ajusta a este propósito en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Ecuación de la recta ajustada

Polinomio	Ecuación
Recta	$E = 0,0028X + 0,7314$

El siguiente paso, consiste en analizar el error de las medidas reportadas por el sistema implementado. Para ello, en primera instancia, se calcula el error absoluto entre cada punto de energía y su valor correspondiente en el ajuste realizado.

Se obtiene un error bastante elevado, promovido por la gran dispersión que presentan los puntos. El error máximo calculado es de 0,0655 en unidades de energía. Para visualizar su efecto sobre las medidas se puede propagar hacia la salida para obtener un error en unidades de desplazamiento.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial E} \Delta E$$

$$\Delta x = 347 \cdot 0,0655 = 22,7 \mu m$$

Para reducir el efecto del ruido y con ello, el error en las medidas, se puede promediar el valor de las 30 imágenes que se capturan en cada desplazamiento realizado. Para cuantificar dicha reducción del error se muestra en la tabla 5.6, los valores de los errores antes y después de promediar las medidas.

Tabla 5.6 Errores en la entrada y salida del sistema

Desviación máxima	Energía	Desplazamiento [μm]
Sin promediar	0,0655	22,77
Promediando	0,0213	7,34

Por último, tras realizar el promediado de las medidas, se procede a representar la respuesta que presenta el sistema desarrollado mediante el ajuste realizado por la recta descrita anteriormente. A continuación, se ilustra en la figura 5.29 la respuesta ideal que debería presentar el sistema frente a la respuesta real que se obtiene.

En este caso, la medida del desplazamiento con fibra óptica de $50\mu m$ provoca una peor respuesta del sistema que utilizando la fibra de $250\mu m$ y que posee un mayor número de modos. Se puede comprobar que la respuesta real no se ajusta adecuadamente a la respuesta ideal, lo que provoca que este tipo fibra no sea muy adecuado para la medida de desplazamiento en nuestro sistema.

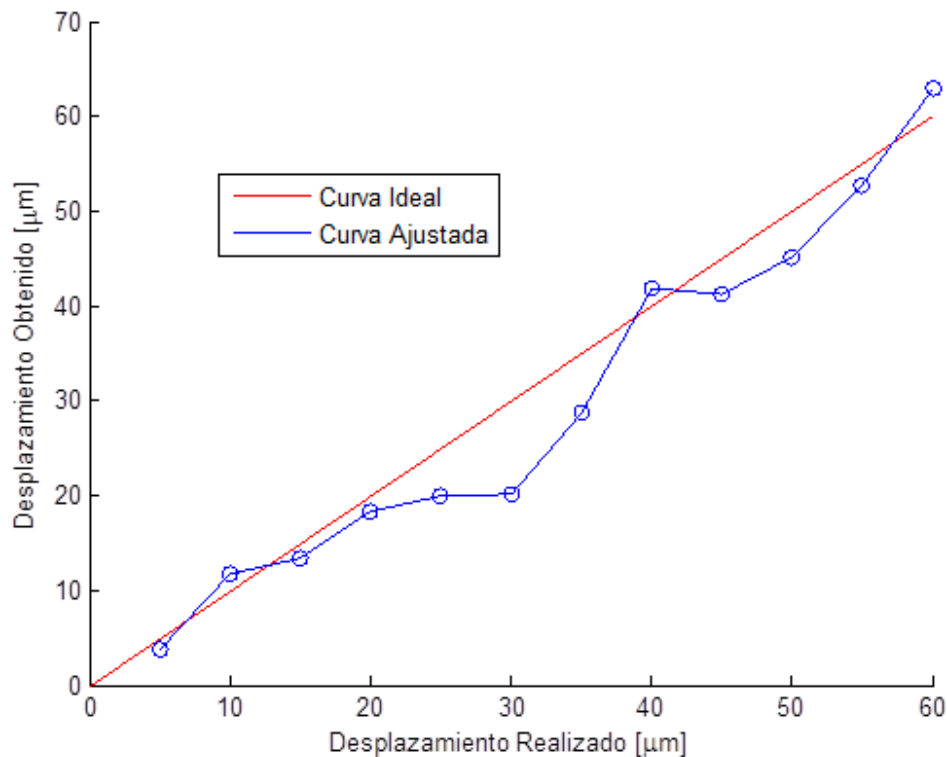


Figura 5.29 Respuesta final del sistema implementado

Al igual que en los casos anteriores, se concluye el apartado con un pequeño análisis sobre el ruido modal que afecta al sistema.

Para realizar el análisis de ruido modal, se captura un video de 40 segundos a razón de 15 imágenes por segundo. Mediante esta captura se analiza la oscilación que provoca el ruido en el descriptor de energía de la matriz de energía.

La figura 5.30 representa una nube de puntos dispersos que indican la fluctuación aleatoria del ruido que se introduce al sistema provocado por agentes externos a dicho sistema.

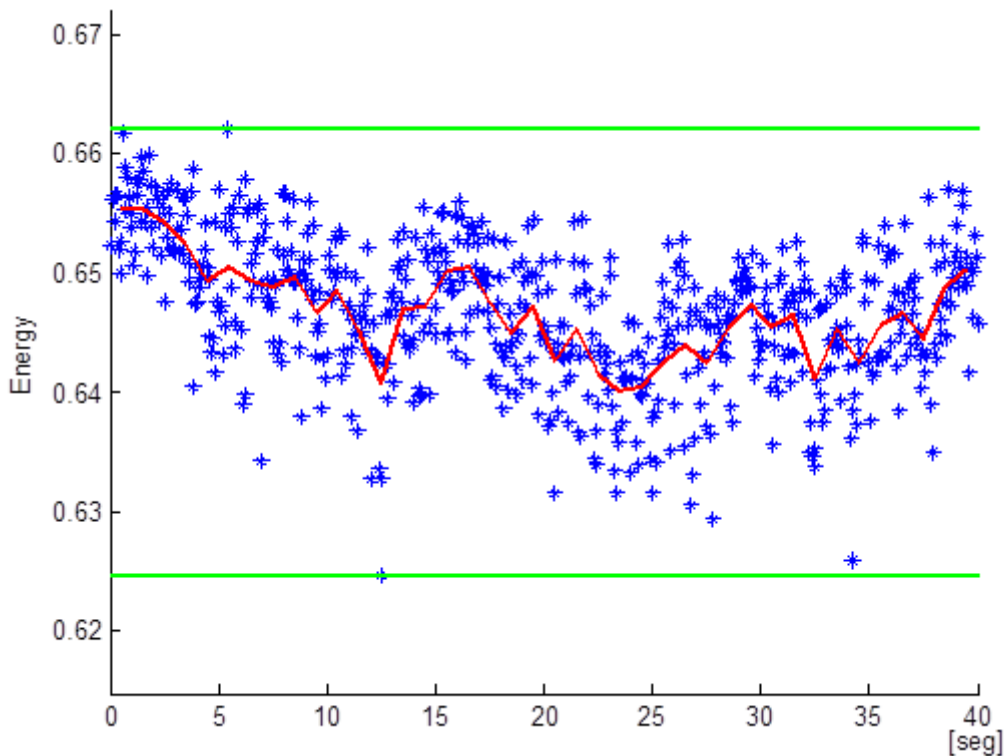


Figura 5.30 Evolución de la energía del ruido (fibra 50µm)

En la ilustración, se han resaltado los límites en los que oscila la energía cuando el sistema es afectado por el ruido modal. Este efecto provoca que las medidas fluctúen constantemente introduciendo un error importante en el sistema. Como solución, se deben promediar siempre las medidas realizadas para cada desplazamiento y de esta manera, paliar su efecto en lo mayor posible.

Finalmente, se introduce el ruido en el sistema y se evalúa la respuesta que este reporta. De tal modo, que se pueda apreciar visualmente, el error producido en unidades de desplazamiento.

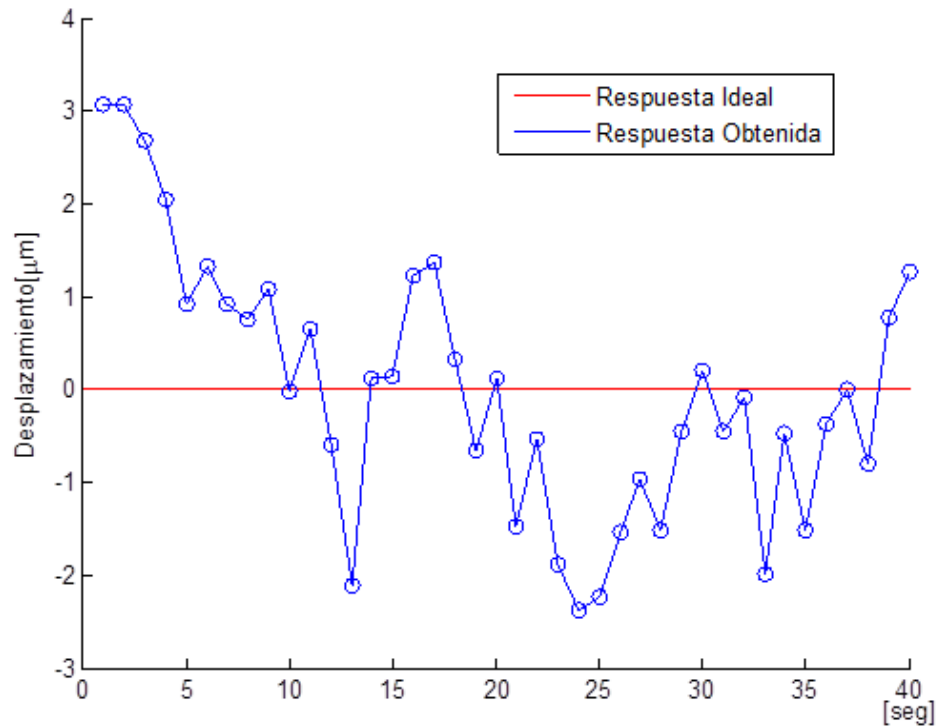


Figura 5.31 Repercusión del ruido en el sistema con fibra de 50 μm

En la figura 5.31 se puede apreciar el efecto del ruido modal y cómo repercute negativamente en el sistema implementado. Por ello, se debe tratar de reducir siempre su efecto, puesto que conlleva a estropear la respuesta del sistema y por consiguiente, la precisión y exactitud de las medidas que se realicen.

Después de ilustrar los resultados experimentales desarrollados para cada tipo de fibra se procede, en el capítulo siguiente, a exponer de manera resumida las conclusiones que pueden ser obtenidas.

5.5. Resumen de los resultados

A modo de conclusión final se deduce que los tres tipos de fibra facilitan una respuesta correlacionada con el desplazamiento que se aplique. La calidad y precisión de la medida dependen fuertemente del tipo de fibra y del ruido modal que presente el sistema con las citadas fibras ópticas.

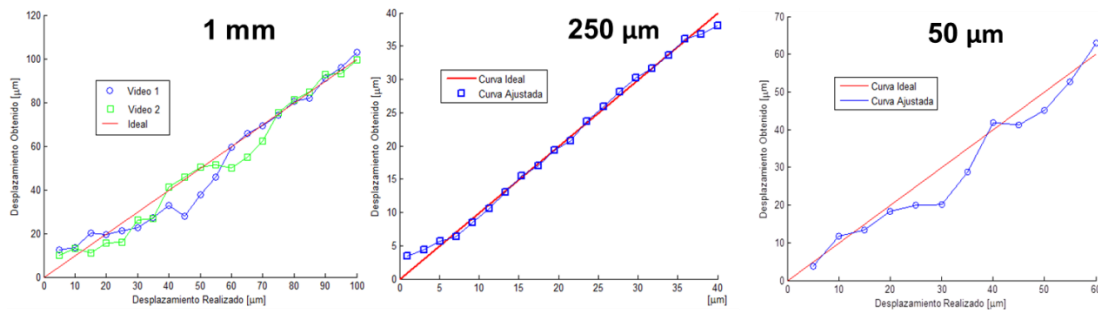


Figura 5.32 Respuesta del sistema con los 3 tipos de fibra utilizada.

En la figura 5.32 se ha representado la respuesta experimental que se obtiene con cada tipo de fibra. Como ya se ha comentado, todas ellas presentan una cierta correlación tras procesar los patrones de speckle capturados mediante la matriz de coocurrencia de niveles de gris y realizar un promedio de los resultados. Además se deduce que la fibra de $250\ \mu\text{m}$ implementa el sistema con la mejor calidad en las medidas realizadas. Esto se puede visualizar gráficamente, puesto que los puntos que mejor se ajustan a la curva ideal corresponden a dicha fibra.

6

CAPÍTULO

6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

6.1. Conclusiones obtenidas

En este capítulo trata de resumir los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto, destacando únicamente los datos más relevantes. Cabe destacar, que se ha logrado el objetivo principal de este trabajo, debido principalmente al análisis que se ha llevado a cabo. Este análisis permite el procesamiento de patrones de speckle mediante la energía de la matriz de coocurrencia para obtener una buena relación lineal respecto al desplazamiento lineal que se realiza en la fibra óptica.

Todo el sistema se ha desarrollado siguiendo un montaje muy sencillo con componentes muy comunes y de bajo coste que era otro de los objetivos a tener en cuenta en la implementación. Además se ha conseguido obtener resultados muy coherentes con lo estimado teóricamente y con bastante calidad en cuanto a las medidas se refiere.

Primeramente, se procede a analizar la linealidad del sistema desarrollado. En concreto, se trata de analizar la linealidad que reportan los descriptores utilizados en el análisis de la matriz de coocurrencia y por consiguiente, destacar el que mejor comportamiento presenta.

Tabla 6.1 Análisis de la linealidad de las fibras

LINEALIDAD DE LOS DESCRIPTORES			
FIBRA	Contraste	Correlación	Energía
1 mm	Reducida	Reducida	Alta
250 μm	Media	Media	Alta
50 μm	Reducida	Reducida	Alta

Como se puede comprobar, la energía es el descriptor que mejor satisface la condición de linealidad del sistema implementado. Por esta razón, como ya se explicó en el capítulo anterior, se utiliza la energía de la matriz de coocurrencia para relacionar las variaciones de los patrones de speckle con el desplazamiento lineal que se realiza.

Otros métodos para el análisis de texturas que se llevaron a cabo, como la correlación, la diferencia de patrones o el producto interno de intensidad fueron descartados por reportar datos con escasa linealidad de las medidas y con errores más elevados que en utilizando la matriz de coocurrencia.

Una vez argumentada la energía de la matriz de coocurrencia como la mejor técnica en cuanto a comportamiento lineal del sistema que se reseña, se procede a describir las características más importantes del sistema para cada una de las fibras ópticas utilizadas en dicho trabajo.

La siguiente tabla proporciona información sobre las medidas obtenidas en el sistema desarrollado en función de tipo de fibra, lo cual, permite evaluar cuál de ellas ofrece un mejor comportamiento a los desplazamientos que se aplican.

Tabla 6.2: Características del sistema

CARASTERISTICAS SEGÚN FIBRA ÓPTICA			
Fibra	1 mm	250 μm	50 μm
Rango lineal (μm)	100	40 – 80	60
Sensibilidad (u.E./ μm)	0,000632	0,0128	0,0028
Sensibilidad (μm / u.E.)	1582,3	78,1	357,1
Error máximo absoluto (u.E.)	0,0124	0,0381	0,0655
Error máximo de la medida (μm)	19,6	2,93	22,7
Error promediando (μm)	13,6	1,98	7,3

Atendiendo a los rangos que presentan las fibras, se comprueba que cuanto mayor es el diámetro del núcleo de la fibra, mayor es el rango dinámico que puede alcanzar el sistema. El límite superior está acotado principalmente por la elongación longitudinal de cada fibra que permite realizar desplazamientos dentro del margen elástico sin que la fibra sobrepase el punto límite de deformación permanente. Por lo tanto, si se alcanza dicho punto la atenuación aumenta considerablemente propiciando que el sistema no detecte luz y no se puedan medir los desplazamientos, además de provoca una deformación en la fibra que estropea el sistema desarrollado. Por otra parte, el límite inferior, se debe al montaje implementado. Debido a que la sujeción de la fibra en el dispositivo que realiza el desplazamiento no es la más adecuada, dicha fibra no presenta la tensión inicial adecuada y provoca que el sistema comience a responder correctamente a partir de un cierto desplazamiento. No obstante, este hecho no es muy significativo puesto que se puede reducir mejorando el sistema o incluso eliminarlo si se empieza a medir con un cierto desplazamiento que se fija como el desplazamiento inicial. Además, estas mejoras permitirían reducir el límite inferior y por consiguiente aumentar en algunos casos, el rango lineal del sistema implementado.

Si se analizan las sensibilidades de cada fibra, se observar que la fibra de 1 mm presenta una sensibilidad que provoca que la energía varíe lentamente al incrementarse el desplazamiento, esta circunstancia se ilustra en la figura 6.1 (a). Si se analiza el caso opuesto, el sistema es muy sensible a los pequeños cambios de energía, por este motivo, al tener demasiada sensibilidad dicho sistema se ve altamente afectado por el ruido. La figura 6.1 (b) ilustra un ejemplo de dicha sensibilidad.

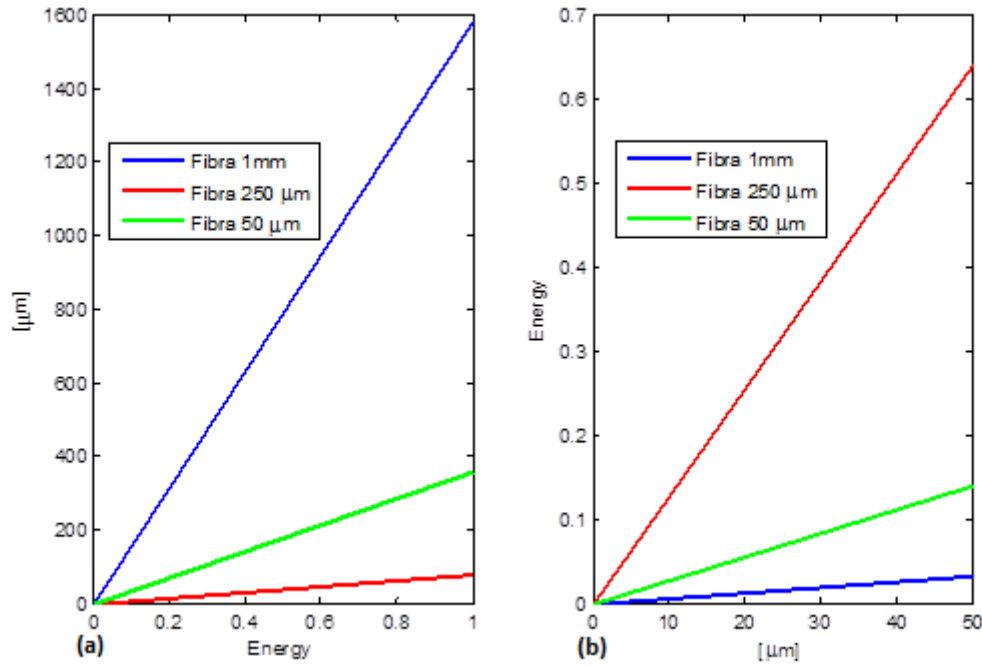


Figura 6.1 Sensibilidad de las fibras ópticas

Este mismo problema sucede con la fibra óptica de $50 \mu m$ ya que presenta una sensibilidad también elevada a los pequeños cambios de energía aunque en menor proporción.

Por el contrario, la fibra de $250 \mu m$ presenta una sensibilidad más reducida a las variaciones de energía, haciendo un sistema con mejor respuesta frente al ruido modal. Por lo tanto, es de suponer que dicha fibra presente la mejor respuesta de las tres posibles. Por dicha razón, aunque primeramente la fibra que menor error o desviación máxima presenta es la fibra de $1 mm$, tras calcularse y realizar el ajuste de curva adecuado, el sistema que mejor responde es el implementado con la fibra de $250 \mu m$. Dicha condición se puede comprobar analizando los errores iniciales en unidades de energía y su propagación a la salida en términos de desplazamiento.

También resulta interesante analizar el efecto que tiene el promediado de las medidas. Se puede comprobar en la tabla 6.2 que el error sin promediar presenta un valor mucho más elevado. Por esta razón, resulta importante y adecuado promediar las medidas. Si para cada desplazamiento se realizan varias medidas y después se promedian, se reduce el efecto del ruido y el error, lo que incide positivamente en mejor la precisión y exactitud de las medidas.

Por conclusión, la mejor respuesta del sistema se obtiene con la fibra de $250 \mu m$, ya que, por una parte, presenta una linealidad muy elevada dentro del rango definido y por otra parte, es la fibra que mejor responde frente al ruido modal, por lo que su repercusión en el sistema es mucho más reducida. Por lo tanto, se ha cumplido con los objetivos especificados, en el primer capítulo, para este proyecto.

6.2. Líneas futuras de trabajo

Este proyecto ha permitido obtener una buena relación entre los patrones de speckle que genera la fibra óptica del sistema y el desplazamiento aplicado cumpliendo de esta manera con el objetivo principal de dicho trabajo. No obstante, no finaliza aquí su estudio ni mucho menos su desarrollo para nuevos sistemas o aplicaciones. A continuación, se explican algunas áreas de estudio por donde se puede seguir avanzando para lograr nuevos objetivos.

Primeramente, se puede llevar a cabo una mejora de las propiedades del sistema desarrollado. Para ello, se puede reducir el efecto del ruido modal realizando un montaje que permita al sistema aislarse de agentes externos, reduciendo el error y mejorando la precisión de las medidas.

Por otro lado, resulta interesante abordar la etapa de procesamiento de imágenes con referencia a los patrones. La matriz de coocurrencia precisa realizar gran cantidad de operaciones ralentizando la respuesta del sistema. Por lo tanto, es importante mejorar el procesamiento de los datos y de esta forma, reducir el tiempo de cómputo.

Esta reducción de tiempo en el procesamiento puede facilitar la creación de un sistema que responda en tiempo real o en tiempo cuasi-real. Además, se podrían implementar rutinas que permitan un calibrado del sistema para reducir el error sistemático que presenta, y rutinas para el análisis del ruido modal que permitan su eliminación.

También es importante analizar el aspecto económico. El sistema desarrollado es bastante barato, puesto que utiliza fibra óptica de plástico y una cámara web de uso doméstico. Sin embargo, se puede reemplazar el láser de He-Ne por un diodo láser, como los incorporados en los lectores, que presentan un bajo coste, inferior a 2 €. Esto conlleva a una reducción importante del coste y del tamaño del sistema. Este láser aunque presenta menor longitud de coherencia todavía permite generar y obtener correctamente patrones speckle.

Como paso final, se pueden integrar todas las partes del sistema en un pequeño dispositivo portátil para crear un sensor de medida de desplazamientos micrométricos. Dicho sistema puede estar formado por un diodo láser, un tramo de fibra óptica con un tramo donde se realice la perturbación, un pequeño sensor óptico que capture las imágenes, un microcontrolador o FPGA que reemplace a la CPU del ordenador, una memoria ROM para almacenar el código del programa, una memoria RAM para registrar los datos obtenidos y como salida se puede emplear una pantalla LCD o un bus de datos (USB, GPIB) para su comunicación con otros dispositivos.

Otra línea de investigación futura reside en analizar desplazamientos angulares, en vez de desplazamientos lineales, a través de patrones de speckle. Se han realizado algunas medidas durante el desarrollo de este proyecto en desplazamientos angulares pero sin llegar a ninguna relación coherente.

La integración anteriormente descrita, puede permitir la utilización de dicho sensor en múltiples aplicaciones, a saber, como parte de brazos robóticos o también conocidos como robots mecánicos que son ampliamente utilizados en las industrias actuales. También se puede implementar en aplicaciones donde se desee medir vibraciones, presión o fuerza, ya que se comprobó su relación con el desplazamiento realizado en la fibra óptica.

Aunque se han enumerado ciertas líneas futuras en las que se pueda proseguir con el trabajo realizado, no son las únicas y se puede proseguir con cualquier otro desarrollo puesto que el estudio del speckle es un campo muy amplio aún sin caracterizar totalmente.

REFERENCIAS

- [1] **Blotta, Eduardo Luis.** "Caracterización de patrones de speckle dinámico mediante técnicas de morfología matemática". Tesis, Universidad de la Plata (2010).
- [2] **Rigden, J. D.** "The granularity of scattered optical maser light". *Proc. IRE* 50, 2367 (1962).
- [3] **Gabor, D.** "Laser speckle and its elimination", *IBM Journal of Research and Development*, volumen 14, 509, (1970).
- [4] **Dainty, J. C.** "Laser speckle and Related Topics" *Topics in Applied Physics*, Volumen 9, 298, (1975).
- [5] **Takai, T. Asakura and B.** "Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the diffuse object". *Applied Physics* Volume 25, Issue 3, 179, (1981).
- [6] **Eric G. Rawson, Joseph W. Goodman, Robert E. Norton.** "Frequency dependence of modal noise in multimode optical fibers". *JOSA*, Vol. 70, Issue 8, 968, (1980).
- [7] **Abdiel Pino, Josep Pladellors.** "Measure of roughness of paper using speckle". *Opt. Eng.* 50(9), 093605, (2009).
- [8] **Francis T. S. Yu, Meiyuan Wen, Shizhuo Yin, and Chii-Maw Uang.** "Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields." *Applied Optics*, Vol. 32, Issue 25, 4685, (1993).
- [9] **Bo Wang, Youwei Fu, Yuexin Liu, Ruyan Guo, Francis T.S. Yu,** "Displacement Sensing with Hetero-Core Fiber Specklegram". *Proceedings of the SPIE*, Volume 5560, 164 (2004).
- [10] **Felipe Marcet, Adelina.** *Manual de óptica geométrica : teoría y cuestiones.* Universidad de Valencia, 1998.
- [11] **Gasvik, Kjell J.** "Optical Metrology". Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [12] **Goodman, Joseph W.** *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications.* (2006).
- [13] **Goodman, J. W.** "Some fundamental properties of speckle". *JOSA*, Vol. 66, Issue 11, 1145, (1976).
- [14] **Polit, W. Richards A.** *Texture matching.* Kibernetik, (1974).
- [15] **K. D., Bennett - J. C. McKeeman and R. G. Ma.** "Full field analysis of mode domain sensor signals". *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* (1988).

- [16] **Salazar, F. Gascón and F.** *Simulation of Rough Surfaces and Analysis of Roughness by MATLAB*. UPM : Departamento de Física Aplicada.
- [17] **El-Sherif, Jay Radhakrishnan and Mahmoud A.** *Analysis on Spatial Intensity Modulation for Fiber-optic Sensor Applications*. Drexel University, Philadelphia : Department of Materials Engineering, 1996.
- [18] **Presutti, Miriam.** *La matriz de coocurrencia en la clasificación multiespectral*. Universidad Nacional de La Plata : Departamento de Ambiente y Recursos Naturales, 2004.
- [19] **Jorge A.Gómez, Ángel Salazar.** *Self-correlation fiber specklegram sensor using volume characteristics of speckle patterns*. Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia) : Grupo de Óptica y Espectroscopía, 2012.
- [20] **Sendra, Gonzalo Hernán.** *Análisis de actividad en patrones de speckle dinámico*. Buenos Aires, Argentina : Universidad Nacional de Mar del Plata, 2009.
- [21] **W. B. Spillman, Jr., B. R. Kline, L. B. Maurice, and P. L. Fuhr.** *Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses*. University of Vermont : Electrical Engineering Department, 1989.
- [22] **Boyce, J.E Haddon and J.E.** *Co-ocurrence matrices for image analysis*. s.l. : Electronics & Communication Engineering Journal, 1993.
- [23] **H. Yoshimura, T. Asaku, B. Takai.** *Spatial coherence properties of light from optical fibres*. University of Sapporo, Japan : Department of Electronics and Information Engineering, 1991.
- [24] **Robert M. Haralick, K. Shanmugan and Itshak Dinstein.** *Textural Features for Image Classification*. Kansas, United States : NASA and Sciences Laboratory of the US Army Engineer, 1973.
- [25] **Leen-Kiat Soh, Costas Tsatsoulis.** *Texture Analysis of SAR Sea Ice Imagery Using Gray Level Co-Occurrence Matrices*. University of Nebraska and University of Kansas : Department of Computer Science and Engineering, 1999.
- [26] **Luis Rodriguez-Cobo, Mauro Lomer*, Carlos Galindez and J.M. Lopez-Higuera.** *Speckle characterization in multimode fibers for sensing applications*. University of Cantabria : Photonics Engineering Group.
- [27] **W. B. Spillman Jr, M. Mayer, J. Bennett and X. Xu.** *A smart bed for non-intrusive monitoring of patient physiological factors*. Blacksburg, USA : Virginia Tech Applied Biosciences Center, 2003.
- [28] **Leendertz, J. A.** *Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect*. University of Technology, Leics. : Department of Mechanical Engineering, Loughborough, 1969.

- [29] **Briers, J. David.** *Laser Doppler and time-varying speckle: a reconciliation.* Kingston University, UK : School of Applied Physics, 1995.
- [30] **Sirkis, Chia-Chen Chang and James S.** *Design of fiber optic sensor systems for low velocity impact detection.* Washington : Naval Research Laboratory, 1997.
- [31] **B. Crosignani, B. Daino, and P. Di Porto.** *Speckle-pattern visibility of light transmitted through a multimode optical fiber.* Optical Society of America : Jota Letters, 1976.
- [32] **Asakura, Nobukatsu Takai and Toshimitsu.** *Statistical properties of laser speckles produced under.* Hokkaido University, Sapporo, Japan : Research Institute of Applied Electricity, 1985.
- [33] **Ivan Lujo, Pavo Klokoč, Tin Komljenović and Zvonimir Šipuš.** *Measuring structural vibrations with a multimode fiber optical sensor.* University of Zagreb, Croatia : Faculty of Electrical Engineering and Computing.
- [34] **Eric Fujiwara, Yu Tzu Wu, Carlos Kenichi Suzuki.** *Vibration-based specklegram fiber sensor for measurement of properties of liquids.* University of Campinas, Sao Paulo : Laboratory of Photonic Materials and Devices, 2012.
- [35] **Asakura, Nobukatsu Takai and Toshimitsu.** *Laser speckles produced by a diffuse object under illumination from a multimode optical fiber.* Sapporo, Japan : Research Institute of Applied Electricity, 1988.
- [36] **KAMINOW, IVAN P.** "Polarization in Optical Fibers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-17, 15, 1981.
- [37] **C. Koeppen, R. F. Shi, W. D. Chen, and A. F. Garito.** *Properties of plastic optical fibers.* University of Pennsylvania : Department of Physics and Astronomy, 1997.
- [38] **V. Kotov, G. Shkerdin, D. Shkerdin, J. Stiens, R. Vounckx.** *Speckle reduction of optical fields in multi-mode fibers .* Brussels, Belgium : Lab for Micro- and Optoelectronics.
- [39] *Multimode optical fiber core measurement by speckle correlation.* Universidad Nacional de La Plata, Argentina : Faculty of Engineering, 1996.
- [40] **Matlab.** Ajustes de Curvas. Manual de ayuda del programa.
- [41] **Cuenca, Esther de Ves.** *Matlab: introducción al procesamiento de imágenes.* Visión por ordenador.
- [42] **Higuera, José Manuel Chicharro.** *Estudio de la magnetostricción por interferometría de speckle.* Madrid : Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 2010.

- [43] **Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundi.** *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement.* Nanyang Technological University, Singapore : School of Mechanical and Aerospace Engineering, 2009.
- [44] **Thomas R. Moore, Ashley E. Cannaday and Sarah A. Zietlow.** *Imaging of vibrating objects using speckle subtraction.* Paul J. Hagerty High School, Oviedo : Department of Physics, 2010.
- [45] *Extracción de características de textura.* Universidad de Sevilla : Escuela Superior de Ingenieros.
- [46] **José Luis Alba, Jesús Cid, Inmaculada Mora.** *Métodos de análisis de imágenes.* Madrid : Universidad Carlos III, 2006.
- [47] **Platero, Carlos.** *Interpretación automática de las imágenes.* Dpto. Electrónica, Automática e Informática Industrial, 2009.
- [48] **José Luis Alba y Fernando Martín.** *Realzado de imágenes.* Universidad de Vigo, 2006.
- [49] **Erika Danaé López-Espinoza, Leopoldo Altamirano Robles.** *Segmentación Markoviana Usando Modelos de Textura.* México : Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2009.
- [50] **Martín, Cristina Barba.** *Caracterización y clasificación de estructuras con sistema de visión 360°.* Madrid : Universidad Pontificia Comillas, 2008.