



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño y caracterización de rejillas de difracción  
para un sistema láser de amplio espectro**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

**XADIA CATALINA PÉREZ ANGUIANO**

DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. María del Carmen López Bautista



CIUDAD UNIVERSITARIA  
Febrero - 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# Dedicatoria

*A mi por siempre dulce hermano: Toto.*

---

No puedo ni siquiera imaginar que ya ha pasado casi un año desde que te fuiste. La verdad para mí, el tiempo se ha congelado desde aquel momento y los días, las semanas, los meses, no corren. Para llegar a donde estoy desde entonces, he tenido que mirar a otro lado, sin poder tratar apropiadamente la herida.

Han habido algunos días más difíciles que otros y no te miento, pensé en abandonar este proyecto al menos un centenar de veces, pensé que no valía la pena, pues, ¿de qué me sirve tener un papel, cuando TÚ no estás aquí a mi lado?

Sin embargo, no quiero ser egoísta y concluiré esta etapa académica, ya que este logro es más tuyo que mío. Estuviste conmigo desde el día en que me dieron la carta de aceptación a la facultad, me acompañaste a mi primer día de clases, buscamos mis primeros salones juntos, estuviste ahí en inicios y finales de semestres, me escuchaste cuando me quejaba de los profesores y las clases que me frustraban y también me escuchaste cuando las cosas iban bien, me ayudaste en cada trámite, cada derrota, cada éxito, cada paso que daba y en cada caída que tenía. No es necesario decir que no sólo estuviste para mí durante mi travesía por la universidad, sino durante los casi 25 años de mi vida.

Nunca me cansaré de afirmar que fuiste un amigo, un tutor, un asesor, un consejero, un cómplice, un guardián, mi guía, mi apoyo y más que un hermano, un padre. Muchos no lo comprenden, pero en resumen: TÚ lo eras, eres y serás todo para mí en esta vida. El destino ha jugado una vez más en contra de mis deseos y te ha apartado físicamente de mí, por lo que ahora sólo me resta continuar luchando, tal como me enseñaste.

Deseo con todo mi ser dedicarte esta tesis, el trabajo más doloroso que he llevado a cabo, puesto que te embarcaste en tu nuevo y largo viaje justo el día en que la comencé. Vivo con la promesa de un día reunirnos de nuevo y puedo decirte que me esforzaré por ser una persona de la que puedas estar orgulloso. A partir de ahora, intentaré calmar el dolor que dejó de tu partida, aunque no sea nada fácil (créeme que no lo es), pero por ti estoy dispuesta a hacerlo, sólo obsérvame y guíame desde donde estés.

Te dedico mi esfuerzo y noches de desvelo, no sólo las que ya han pasado, sino también las que vendrán, mis proyectos, mis metas y logros...

En pocas palabras,  
te dedico mi vida.



# Agradecimientos

A ustedes, mi madre, padre y hermanos, quiero decirles que estoy orgullosa de lo que somos, siempre contaremos los unos con los otros, nunca nos abandonaremos.

Quiero agradecer a mi madre, Francisca. Siempre has sido un pilar muy importante en mi vida. Tus enseñanzas, consejos e incluso tus regaños me han ayudado a crecer como persona. Gracias por traerme a este mundo, gracias por ayudarme a vivir en él, gracias por existir.

A mi hermano, Iván. Gracias por todo tu apoyo, por los consejos, por las peleas, por las risas y más. Como dijera Toto: ¡hay que echarle ganas, muchacho!

A mi padre, Antonio. Gracias por estar siempre ahí, a pesar de nuestras diferencias, durante todos los años de mi vida.

A dos personitas muy importantes, que llegaron a mi vida para quedarse. Ya han estado en la peor etapa de mi vida, y también en los momentos buenos. Me apoyé mucho en ustedes para poder seguir, me di cuenta del tesoro que en realidad son. Vale: no tengo palabras suficientes para decirte lo importante que eres para mí, gracias infinitas. Giiiio: tu presencia siempre como un huracán, me saca de mi letargo y me anima a continuar, gracias por todo.

A Danna y Manuelito que estuvieron más cerca de mi durante esta etapa de mi vida.

A mis viejos y no tan viejos amigos, con los cuales he compartido tiempo, juegos, anécdotas, risas y llanto, la lista es un poco larga, pero no interminable, todos ustedes saben quiénes son y cuan importantes resultan para mí.

A mi directora de tesis, Carmen. Por haberme apoyado todo este tiempo en diferentes aspectos, incluso haberme acompañado fuera de las actividades académicas en tiempos dolorosos. Gracias por ser una persona tan amable, gracias por guiar este trabajo.

A mi grupo de sinodales por los comentarios y sugerencias a esta tesis, su conocimiento y experiencia es invaluable, gracias por su tiempo y esfuerzo, sin duda este trabajo no sería lo mismo sin su orientación.

A la profesora Selene, la cual me apoyó en algunos puntos clave de esta tesis e incluso llegó a escucharme en momentos personales muy difíciles.

Por último, también quiero agradecer a todos esos profesores, compañeros, conocidos y desconocidos que con sus comentarios mezquinos, poco tacto y actitudes poco éticas hacia mi persona, mi trabajo y mi esfuerzo, ayudaron a darme cuenta de la importancia de nunca rendirme y de permanecer de pie, aunque las circunstancias hayan tratado de ponerme de rodillas.

---

**“Si en la lucha el destino te derriba,  
si todo en tu camino es cuesta arriba,  
si tu sonrisa es ansia insatisfecha,  
si hay siembra excesiva y pésima cosecha,  
si a tu caudal se le oponen diques:  
¡Date una tregua amigo, pero no claudiques!”**

---

**Rudyard Kipling**

---



# Índice de Contenido

## CAPÍTULO 1 \_\_\_\_\_ 4

### Introducción \_\_\_\_\_ 4

1.1 Antecedentes _____	4
1.2 Objetivo Principal _____	5
1.3 Objetivos Particulares _____	5
1.4 Metodología _____	6
1.5 Resultados esperados _____	7
1.6 Referencias del capítulo 1 _____	7

## CAPÍTULO 2 \_\_\_\_\_ 8

### Rejillas de difracción y sistemas láser de amplio espectro: revisión del estado del arte \_\_\_\_\_ 8

2.1 Introducción _____	8
2.2 Separación espectral de elementos de amplio espectro _____	8
2.3 Rejillas de difracción _____	9
2.3.1 Clasificación de rejillas de difracción _____	9
2.3.2 Métodos de fabricación _____	10
2.3.3 Aplicaciones de las rejillas de difracción _____	12
2.3.4 Las rejillas de difracción en la actualidad _____	13
2.4 Sistemas láser de amplio espectro _____	19
2.4.1 Efectos no lineales en sistemas de comunicaciones ópticas _____	19
2.4.2 Aplicaciones de los sistemas láser de amplio espectro _____	22
2.4.3 Los sistemas láser de amplio espectro en la actualidad _____	23
2.5 Rejillas de difracción basadas en arreglos de fibra óptica _____	28
2.6 Conclusiones _____	31
2.7 Referencias del capítulo 2 _____	32

## CAPÍTULO 3 \_\_\_\_\_ 35

### Teoría de rejillas de difracción y sus características \_\_\_\_\_ 35

3.1 Introducción _____	35
3.2 Antecedentes del fenómeno de difracción _____	35
3.2.1 Difracción de Fraunhofer _____	36
3.2.2 Difracción de Fraunhofer aplicada a rejillas de difracción _____	39
3.3 Ecuación de rejilla de difracción _____	40
3.4 Parámetros principales de las rejillas de difracción _____	43
3.4.1 Dispersión angular _____	43
3.4.2 Dispersión lineal _____	43
3.4.3 Resolución de la rejilla _____	44
3.4.4 Resolución espectral _____	44
3.4.5 Ancho de banda _____	44
3.4.6 Magnificación Anamórfica _____	45

3.4.7 Resolución libre espectral	45
3.4.8 Eficiencia de la rejilla	46
3.5 Conclusiones	48
3.6 Referencias del capítulo 3	48

## **CAPÍTULO 4** **49**

### **Diseño y fabricación de rejillas de difracción basadas en arreglos de fibra óptica** **49**

4.1 Introducción	49
4.2 Rejillas experimentales de fibra óptica	49
4.2.1 Fabricación de arreglos de fibra óptica	49
4.2.1.1 Preparación de fibras ópticas	51
4.2.1.2 Realización de la base del arreglo y alineamiento de las fibras	51
4.2.1.3 Unión del arreglo	52
4.2.2 Determinación del error por alineamiento	54
4.2.3 Parámetros principales de las rejillas de difracción de fibra óptica	55
4.2.4 Resultados teóricos de los parámetros de las rejillas de fibra óptica	61
4.2.4.1 Fuentes láser monocromáticas	61
4.2.4.2 Fuente de amplio espectro	61
4.2.4.3 Fuente de amplio espectro: espectro visible	64
4.3 Conclusiones	67
4.4 Referencias del capítulo 4	68

## **CAPÍTULO 5** **69**

### **Estudio experimental del demultiplexado en un sistema láser de amplio espectro con rejillas de difracción basadas en fibra óptica** **69**

5.1 Introducción	69
5.2 Estudio experimental	69
5.2.1 Descripción de la instalación real experimental	69
5.2.1.1 Fuente láser	70
5.2.1.2 Lente convergente	72
5.2.1.3 Rejilla de difracción	72
5.2.1.4 Plano de observación	72
5.2.1.5. Distancias entre elementos	72
5.2.2 Implementación del experimento	73
5.2.3 Toma de datos experimentales	74
5.2.3.1. Experimentación con fuentes monocromáticas	74
5.2.3.2. Experimentación con el sistema láser de amplio espectro	75
5.3 Estudio por medio de simulación numérica	76
5.3.1 Descripción de la instalación virtual	76
5.3.1.1 Fuente luminosa	77
5.3.1.2 Rejilla de difracción	78
5.3.1.3 Plano de observación	80

5.3.2 Ejecución de la simulación	81
5.3.3 Obtención de las simulaciones	85
5.4 Conclusiones	85
5.5 Referencias del capítulo 5	86
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>87</b>
<b>Resultados y comparación de los estudios teóricos y experimentales</b>	<b>87</b>
6.1 Introducción	87
6.2 Resultados experimentales	87
6.2.1 Fuente láser monocromática de $\lambda=633$ nm	87
6.2.2 Fuente láser monocromática de $\lambda=532$ nm	91
6.2.3 Fuente de amplio espectro	93
6.3 Resultados de la simulación	97
6.3.1 Fuente láser de $\lambda=633$ nm	97
6.3.2 Fuente láser de $\lambda=532$ nm	100
6.3.3 Fuente de amplio espectro	102
6.4 Comparación y discusión del comportamiento de las rejillas de fibra óptica	107
6.4.1 El caso de las fuentes láser monocromáticas	108
6.4.2 El caso de la fuente de amplio espectro	113
6.4.3 Rejillas de difracción de fibra óptica frente a rejillas de difracción comunes	118
6.5 Conclusiones del capítulo 6	118
6.6 Referencias del capítulo 6	119
<b>CAPÍTULO 7</b>	<b>120</b>
<b>Conclusiones Generales</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>122</b>
A.1 Espectros de transmisión de materiales	122
A.2 Gráficos de atenuación de fibra óptica	123
A.3 Referencias del Anexo A	125
<b>ANEXO B</b>	<b>126</b>
B.1 Gráficos Teóricos	126
B.1.1 Fuentes Monocromáticas	126
B.1.2 Fuente de amplio espectro	128
B.2 Gráficos Experimentales	130
B.2.1 Fuentes Monocromáticas	130
B.2.2 Fuente de amplio espectro	132
B.3 Gráficos de Simulación	134
B.3.1 Fuentes Monocromáticas	134
B.3.2 Fuente de amplio espectro	136

# CAPÍTULO 1

## Introducción

En la actualidad hay múltiples aplicaciones en el área tecnológica que hacen uso de dispositivos ópticos. En las Telecomunicaciones, por ejemplo, existe la necesidad de utilizar técnicas de codificación, multiplexado y demultiplexado a nivel óptico para poder enviar y recibir grandes volúmenes de información de forma rápida y eficaz por medio de fibra óptica. En los sistemas de multicanalización por longitud de onda (WDM) la información es enviada a través de distintas longitudes de onda, utilizando conjuntos de fuentes láser monocromáticas individuales, lo que implica una gran cantidad de recursos y espacio.

Una solución alternativa, es el empleo de fuentes láser de amplio espectro, que generalmente pueden emitir rangos espectrales entre 400 nm y 2500 nm, con las características deseables de intensidad y alta coherencia de una fuente monocromática. Dentro de las investigaciones recientes de las fuentes de amplio espectro, se encuentra un área que comprende los métodos y técnicas para separación y selección de los diversos componentes espectrales que conforman al haz producido por la fuente, es decir, el demultiplexado de la radiación de amplio espectro.

La separación de los componentes espectrales de una fuente de amplio espectro puede realizarse con elementos ópticos como los monocromadores, demultiplexores, filtros sintonizables y Optical Add-Drop Multiplexers (OADM). Estos elementos a su vez, utilizan para su funcionamiento rejillas de difracción, prismas, Arrayed Waveguide Gratings (AWG), interferómetros, filtros espectrales, entre otros.

Las rejillas de difracción son elementos ópticos pasivos que difractan la luz incidente en direcciones específicas, dependiendo de factores como el ángulo de incidencia, la longitud de onda incidente y las características físicas propias de la rejilla. Existen diferentes tipos de rejillas y pueden fabricarse con diversos métodos y materiales. Es común encontrar esta clase de elementos difractivos dentro de dispositivos como los monocromadores y demultiplexores, o incluso verlos involucrados en procesos de sintonización láser, compresión y ensanchamiento de pulsos.

Las rejillas tienen diversas aplicaciones debido a que pueden funcionar en rangos espectrales amplios, que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo y pueden diseñarse para aplicaciones que demandan altas eficiencias, gran precisión, estabilidad ante condiciones ambientales y periodos largos de vida útil.

### 1.1 Antecedentes

Las fuentes de amplio espectro son útiles en aplicaciones que trabajan en distintos rangos espectrales, como los sistemas de control, tomografía, compresión de pulsos, comunicaciones ópticas, tecnología LIDAR, estudios atmosféricos, procesamiento de imágenes, diagnóstico médico, etc. Esta clase de fuentes láser necesita de dispositivos ópticos que separen sus componentes espectrales de manera precisa y en rangos espectrales extensos.

Las rejillas de difracción como elemento dispersor aplicado a la sintonización y demultiplexado de fuentes de amplio espectro, resultan un campo muy explorable, debido

al su capacidad para trabajar en distintas bandas espectrales, con configuraciones relativamente sencillas.

Sin embargo los demultiplexores ópticos existentes no pueden trabajar aceptablemente en rangos que contemplen el ultravioleta, visible e infrarrojo al mismo tiempo, conservando la alta precisión y estabilidad, debido a las limitaciones de los elementos (prismas, AWG, interferómetros, etc) que los conforman [1]. Es por esto que resulta necesario el estudio de dispositivos ópticos nuevos que puedan cumplir con los requerimientos anteriormente mencionados para trabajar en conjunto con fuentes de amplio espectro y que además puedan adaptarse a sistemas existentes que contemplen el uso de otro tipo de fuentes luminosas.

Es por esta razón, que se indaga en el diseño, fabricación y caracterización de rejillas de difracción que sean de bajo costo, menos frágiles que las rejillas comunes, elaboradas con materiales y procesos sencillos para su uso con fuentes láser, no sólo de amplio espectro, sino también monocromáticas, para posteriormente analizar su comportamiento con miras a futuras aplicaciones en sintonización láser y demultiplexado.

## 1.2 Objetivo Principal

Adquirir conocimientos novedosos sobre el comportamiento de rejillas de difracción especiales hechas con arreglos de fibra óptica, con un enfoque especial a su funcionamiento en conjunto con fuentes de supercontinuo (SC).

## 1.3 Objetivos Particulares

1. Por medio de un estudio de estado de arte, identificar los problemas y retos actuales en la utilización de las rejillas de difracción de los arreglos de fibra óptica, para el demultiplexado de la radiación de las fuentes de SC.
2. Diseñar, fabricar y caracterizar 5 prototipos de rejillas de difracción experimentales hechas de diferentes tipos de fibra óptica
3. Analizar los prototipos anteriores utilizando expresiones generales de rejillas de difracción comunes.
4. Analizar el comportamiento de las rejillas de difracción de fibra óptica en el primer orden de difracción mediante expresiones analíticas, cuando se hace incidir luz de una fuente de  $\lambda=633$  nm y  $\lambda=532$  nm.
5. Analizar el comportamiento de las rejillas de difracción de fibra óptica en el primer orden de difracción mediante expresiones analíticas, cuando se hace incidir luz procedente de una fuente policromática con longitudes de onda entre 400 nm y 2500 nm (emisión de supercontinuo).
6. Analizar el comportamiento de las rejillas de difracción de fibra óptica en el primer orden de difracción mediante expresiones analíticas, cuando se hace incidir luz procedente de una fuente policromática con longitudes de onda entre 390 nm y 800 nm (espectro visible).
7. Simular con el software llamado TracePro, el comportamiento de las 5 rejillas de difracción experimentales cuando se hace incidir sobre ellas luz procedente de fuentes láser ( $\lambda=633$  nm y 532 nm) y de una fuente de supercontinuo en el espectro visible.

8. Hacer pruebas con las 5 rejillas de difracción especiales sobre una instalación experimental, en donde se haga incidir sobre ellas luz procedente de fuentes láser ( $\lambda=633$  nm y 532 nm) y de una fuente de amplio espectro (400 nm-2400 nm).
9. Obtener y analizar el comportamiento experimental que presentan las 5 rejillas de difracción especiales en el rango visible con fuentes monocromáticas y una fuente de amplio espectro.
10. Comparar los resultados teóricos y experimentales obtenidos, concluyendo al respecto.

## 1.4 Metodología

En primera instancia, se ubicarán las fuentes de información donde se describe el funcionamiento y los avances técnicos y científicos de las fuentes de amplio espectro y de las rejillas de difracción comerciales más comunes, así también se identificarán las líneas de investigación y desarrollo de las rejillas de difracción especiales.

En segundo término, se investigarán los aspectos fundamentales para el diseño y fabricación de las rejillas de difracción especiales.

Como tercera etapa, con base en la información obtenida y problemas identificados, se desarrollará la parte teórica y experimental de la tesis, en donde se realizarán prototipos funcionales de rejillas de difracción, para posteriormente cuantificar y analizar sus principales características y parámetros al trabajar con luz proveniente de un sistema láser de amplio espectro y fuentes láser monocromáticas.

En el desarrollo de la tesis se utilizarán los métodos teóricos de análisis de la difracción de la luz, así como la experimentación sobre una maqueta, tanto física como virtual, para demultiplexar un sistema láser de amplio espectro y dos fuentes láser monocromáticas.

En la parte teórica se utilizarán expresiones generales de rejillas de difracción comunes aplicadas al diseño y caracterización de las rejillas especiales de fibra óptica. Posteriormente se podrá concluir si estas expresiones proporcionan buenas aproximaciones al comportamiento de las rejillas especiales al comparar con los resultados obtenidos en la parte experimental.

En la parte experimental se realizarán prototipos funcionales de rejillas de difracción, para posteriormente cuantificar y analizar sus principales características y parámetros. Se plantea la realización de estudios experimentales con fuentes láser de  $\lambda=633$  nm y  $\lambda=532$  nm, denominadas a lo largo de esta tesis como fuentes monocromáticas, y de una fuente de amplio espectro. Sin embargo, se delimitará este estudio a la banda visible de la radiación óptica, por la complejidad de trabajo experimental en la banda infrarroja y la falta de respectivos materiales, elementos y dispositivos de la banda infrarroja disponibles para fines del presente trabajo de tesis.

Además, se plantea un análisis mediante simulación numérica de las rejillas de difracción para comparar el comportamiento experimental con predicciones teóricas obtenidas por medio de simulaciones numéricas. Se considera el uso del software especializado TracePro, una herramienta de simulación que permite modelar las rejillas de fibra óptica y analizar su comportamiento cuando interactúan con fuentes luminosas, utilizando un entorno de elementos ideales. Finalmente, los resultados arrojados por el software serán

analizados y comparados a los obtenidos teóricamente y de manera experimental en el laboratorio.

### 1.5 Resultados esperados

1. Nuevos datos sobre las propiedades de las rejillas de difracción con base en arreglos de fibras ópticas.
2. Cinco muestras (prototipos funcionales) de rejillas de difracción hechas de fibra óptica.
3. Características experimentales y teóricas de las cinco muestras (prototipos) de rejillas de difracción en cuestión.
4. Datos experimentales sobre el comportamiento de dichas rejillas en conjunto con fuentes monocromáticas y fuentes de amplio espectro.
5. Datos sobre el comportamiento de las rejillas en cuestión obtenidos con un software de simulación numérica TracePro, en el caso de fuentes monocromáticas y fuentes de amplio espectro.
6. Comparación de datos obtenidos analíticamente, experimentalmente, y por medio de simulaciones utilizando el TracePro.

### 1.6 Referencias del capítulo 1

- [1] Haupt, M., Reinboth, C. and Fischer, U. (2006). Realization of an Economical Polymer Optical Fiber Demultiplexer. *International Students and Young Scientists Workshop. Photonics and Microsystems.*

## CAPÍTULO 2

### Rejillas de difracción y sistemas láser de amplio espectro: revisión del estado del arte

#### 2.1 Introducción

En este capítulo se reporta el estado del arte de las rejillas de difracción existentes en el mercado, así como una introducción a sus aplicaciones orientadas principalmente a las telecomunicaciones y otras áreas de la ciencia, retomándose las peculiaridades de las rejillas especiales utilizadas en esta investigación al final del capítulo. También se hace una revisión del estado del arte de las fuentes de amplio espectro, usualmente denominadas de supercontinuo, presentando una breve descripción de sus aplicaciones y retos actuales.

Dentro de la problemática de las fuentes de amplio espectro, se encuentra un área que comprende los métodos y técnicas para separación y selección de los diversos componentes espectrales que conforman al haz producido por la fuente. Uno de estos métodos consiste en la utilización de rejillas de difracción, las cuales sirven para dispersar los componentes espectrales individuales que conforman el haz de luz proveniente de la fuente.

Existen distintos tipos de rejillas y en la presente investigación se estudia una clase de rejilla especial basada en arreglos de fibra óptica. Sin embargo para poder entender el estudio que se ha llevado a cabo, resulta de vital importancia conocer y definir los conceptos básicos de rejillas de difracción y de las fuentes láser de amplio espectro, siendo el objetivo de este primer capítulo.

#### 2.2 Separación espectral de elementos de amplio espectro

La separación de los componentes espectrales de una fuente de amplio espectro puede realizarse con prismas, rejillas de difracción, Arrayed Waveguide Gratings (AWG), interferómetros, filtros espectrales, entre otros.

Los monocromadores y filtros sintonizables han sido más explorados en conjunto con fuentes de amplio espectro. En los filtros sintonizables es común el uso de interferómetros Fabry-Perot, Mach-Zehnder y rejillas de Bragg, los cuales tienen respuestas aceptables en rangos espectrales amplios, aunque en ocasiones debe sacrificarse la sencillez de las configuraciones para lograrlo. En los monocromadores es usual encontrar a los prismas y rejillas de difracción.

Los prismas y rejillas de difracción pueden además encontrarse frecuentemente en el proceso de generación de supercontinuo, estando presentes en la parte de compresión de pulsos para posteriormente transmitirlos por materiales altamente no lineales y que se realice el ensanchamiento del espectro.

Los prismas tienen menor poder resolutivo y mayores pérdidas por inserción que las rejillas de difracción. Además estas últimas cuentan con valores de dispersión constantes en rangos amplios de longitud de onda, al contrario que los prismas. Otro punto importante a considerar es que las rejillas presentan dimensiones y peso menores. Los AWG por su

parte, llegan a presentar alta dependencia a condiciones ambientales, como la temperatura, al contrario que las rejillas de difracción.

Las rejillas de difracción como elemento dispersor aplicado a la sintonización y demultiplexado de fuentes de amplio espectro, resultan un campo muy explorable, debido al rango tan amplio en el que pueden llegar a trabajar, abarcando en ocasiones desde el ultravioleta hasta el visible e infrarrojo, con configuraciones relativamente sencillas. Es por esta razón, que se indaga en el diseño, fabricación y caracterización de rejillas de difracción especiales para su uso con fuentes láser no sólo de amplio espectro, sino también monocromáticas, para analizar su comportamiento con miras a futuras aplicaciones en sintonización láser y demultiplexado.

## 2.3 Rejillas de difracción

Una rejilla de difracción se puede conceptualizar como un conjunto de elementos transmisores y/o reflectantes separados por una distancia comparable a la longitud de onda de la fuente lumínica en estudio [1]. Este conjunto de elementos pueden presentarse como una red de elementos difractivos en forma de ranuras o aperturas, o bien pueden ser surcos realizados en un material determinado. El conjunto de elementos de la rejilla de difracción da como resultado una estructura periódica y cuando una onda electromagnética incide sobre la misma, se ocasionan cambios en la amplitud y/o en la fase del campo electromagnético.

### 2.3.1 Clasificación de rejillas de difracción

Existen diferentes formas de clasificar a las rejillas de difracción, entre ellas, la más general las divide en rejillas de reflexión, las cuales consisten de la rejilla superpuesta o realizada directamente en una superficie reflejante y rejillas de transmisión, que son rejillas hechas sobre superficies de materiales transparentes. Las rejillas pueden fabricarse en diversos materiales, por lo que resulta común encontrarlas con capas reflejantes o anti reflejantes.

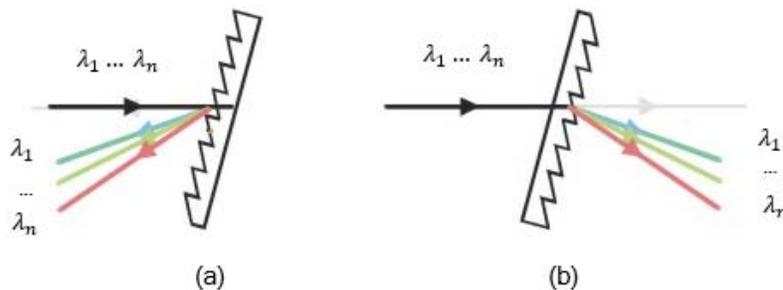


Figura 2.1 Esquema de (a) una rejilla de difracción en reflexión y (b) una rejilla de difracción en transmisión [2].

Otras clasificaciones comunes se basan en el modo de fabricación (holográficas, grabadas mecánicamente), en el patrón (de periodo largo o corto), por la curvatura del sustrato (cóncavas, semiesféricas, planas), por generaciones de lanzamiento al mercado según la tecnología con la que se fabrican (primera o segunda generación) o por campo de aplicación (para espectrometría, sensores, telecomunicaciones, industriales, educativos, investigación).

### 2.3.2 Métodos de fabricación

Una técnica tradicional para la fabricación de rejillas de difracción se basa en una máquina que imprime o graba mecánicamente los surcos sobre la superficie requerida con cuchillas hechas de diamante o acero, como la mostrada en la Figura 2.2. Con esta técnica resulta difícil hacer espaciados entre líneas cada vez menores, pero puede utilizarse para crear rejillas robustas con altas eficiencias de difracción [3], pero presentan altas concentraciones de dispersión de la luz debido a las irregularidades en la superficie del material al momento del grabado.

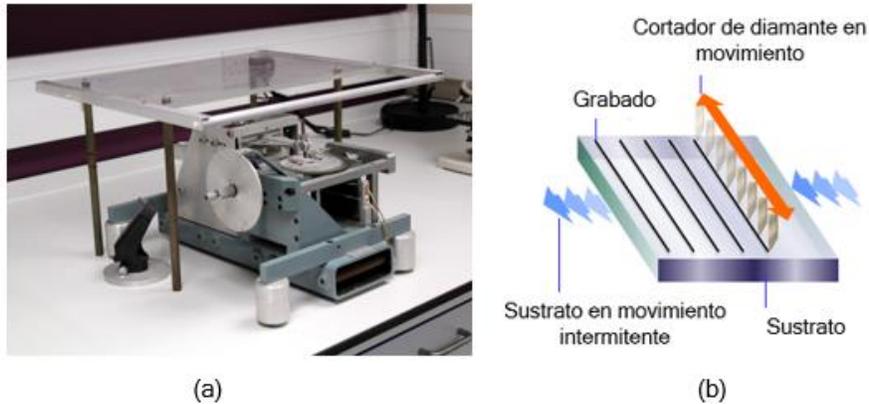


Figura 2.2 (a) Vista de una máquina para grabar rejillas de difracción. (b) Esquema del proceso mecánico de grabado de una rejilla de difracción [4].

Con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, a las máquinas impresoras de surcos para la creación de rejillas de difracción, se incorporaron los láseres, como los de vanadato o itrio dopado con neodimio (Nd:YVO, Nd:YAG), de tungstato dopado con iterbio (Yb:KGW y Yb:KYW), y zafiro dopado con titanio (Ti:Sapphire) especiales para trabajar con cristales, los cuales permitieron llegar a precisiones nanométricas de fabricación. En la Figura 2.3 se puede observar una fotografía de diversas líneas hechas con una máquina de grabado con tecnología láser integrada, en donde el espaciamiento varía de 0.3 a 1.7  $\mu\text{m}$  en incrementos de 50 nm.

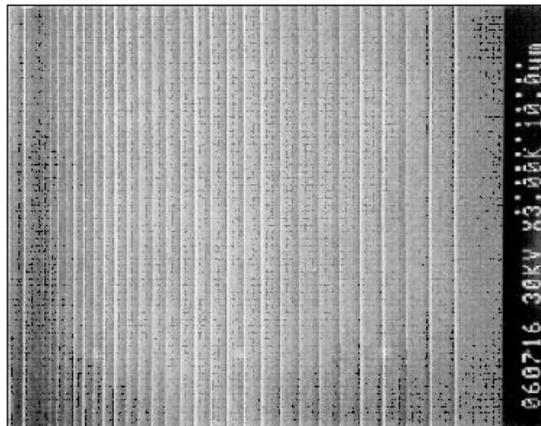


Figura 2.3 Fotografía de diversas líneas realizadas con grabado láser [5].

Otra manera de fabricar rejillas de difracción es utilizando técnicas fotolitográficas que utilizan un patrón de interferencia holográfico, permitiendo realizar estructuras muy finas. En este proceso, dos haces láser (generalmente en el rango ultravioleta) se intersectan produciendo franjas igualmente espaciadas debido a la interferencia, las cuales se superponen en un material fotoresistente sobre el sustrato que será base de la rejilla.

Posteriormente el material fotoresistente se disuelve en proporción a la intensidad de las franjas de intersección, dando como resultado en el caso más simple una rejilla holográfica con una variación de fase senoidal. [6] Adicionalmente se aplica una capa reflejante. En la Figura 2.4 se pueden apreciar los perfiles ideales de las rejillas de difracción holográficas y grabadas mecánicamente más comunes. Cabe mencionar que las rejillas pueden adoptar diferentes formas estructurales para la creación de sus patrones, es decir, se pueden fabricar de forma triangular, cuadrada, rectangular, piramidal, entre otros. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de rejilla de difracción holográfica fabricada con un patrón cilíndrico especial.

Las rejillas de difracción holográficas no tienen errores periódicos ni imperfecciones en la superficie, por lo que la dispersión no deseada de la luz es mucho menor comparada con las rejillas fabricadas con el método de grabado, cuentan además con relaciones señal a ruido más altas que las rejillas grabadas mecánicamente, sin embargo estas últimas poseen mayores eficiencias que las holográficas.

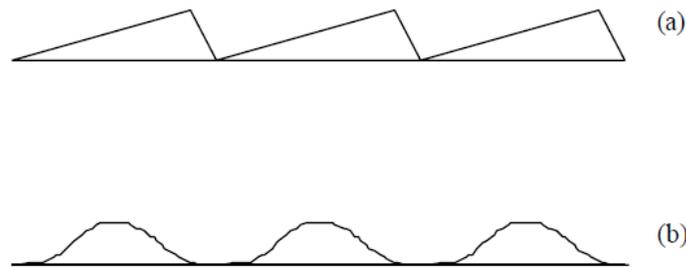


Figura 2.4 Perfiles ideales comunes de las rejillas de difracción. (a) Mecánicamente grabadas. (b) Holográficas [1].

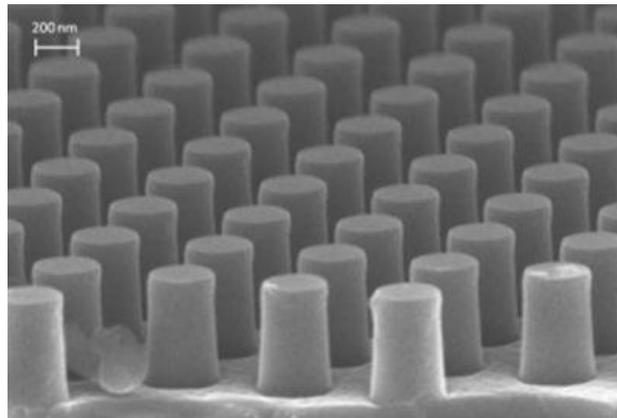


Figura 2.5 Rejilla de difracción holográfica con elementos cilíndricos [7].

La lista de materiales que se pueden utilizar en la fabricación de rejillas de difracción es amplia. Se pueden encontrar rejillas hechas sobre materiales como sílice, metales como aluminio, plata o titanio, diversos dieléctricos, cerámica, polímeros, entre otros. Algunos de los más utilizados son el borosilicato o BK7 especial para componentes ópticos y sílice de diferentes grados de pureza. Tanto el proceso de fabricación, como la selección de dimensiones, características físicas y materiales se realizan dependiendo de la finalidad que tenga la rejilla de difracción.

### 2.3.3 Aplicaciones de las rejillas de difracción

Las aplicaciones de las rejillas de difracción son amplias y variadas. Son de gran importancia dentro de la espectrometría por su rasgo distintivo de separar la luz policromática en sus componentes monocromáticos que la constituyen, pudiendo analizar a la materia por medio de su interacción con la luz. En el área de la espectroscopía, tanto la longitud de onda como la intensidad de la luz es utilizada para recabar información de nivel atómico. La espectroscopía molecular puede llevarse a cabo en longitudes de onda en el rango ultravioleta, visible e infrarrojo, y la instrumentación utilizada cubre por partes estos amplios rangos espectrales.

Se pueden encontrar a las rejillas de difracción en la rama de la astrofísica, en donde son utilizadas para formar espectros de un objeto de interés, generando información acerca de las propiedades del mismo [8], estos experimentos pueden llegar a proveer información acerca de la composición y de los procesos que se llevan a cabo en la atmósfera de los planetas, así también como de los movimientos de los objetos en el universo. En la química, toxicología y ciencias forenses, las rejillas pueden utilizarse en instrumentos que determinan la presencia y concentración de sustancias químicas en diversas muestras, usando las propiedades de la luz cuando es absorbida o emitida por las sustancias.

En tecnología de telecomunicaciones existen diversos dispositivos selectores de longitud de onda, como los filtros interferométricos, las rejillas de Bragg, y los Array Waveguide Gratings (AWG), sin embargo las rejillas de difracción muchas veces representan una relación costo-funcional mejor, ya que a medida que se incrementan los canales en el sistema de comunicaciones, los filtros interferométricos, las rejillas de Bragg, y los Array Waveguide Gratings (AWG) tienden a incrementar sus dimensiones, costos y complejidad, mientras que las rejillas no presentan estas características.

En el área de las telecomunicaciones, las rejillas forman parte de dispositivos llamados multiplexores y demultiplexores para incrementar la capacidad de las redes de fibra óptica por medio de técnicas como la multiplexación por división de longitud de onda o WDM por sus siglas en inglés. Un multiplexor es un componente de un sistema de comunicaciones ópticas que tiene como función combinar varios canales de entrada en uno solo de salida. Un demultiplexor óptico, por otro lado, separa varias longitudes de onda que viajan en un solo canal de entrada para que cada uno pueda viajar en varios canales de salida. A su vez, un multiplexor y un demultiplexor pueden ser utilizados de manera conjunta para crear ruteadores ópticos mejor conocidos como Optical Add-Drop Multiplexers (OADM) y Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers (ROADM).

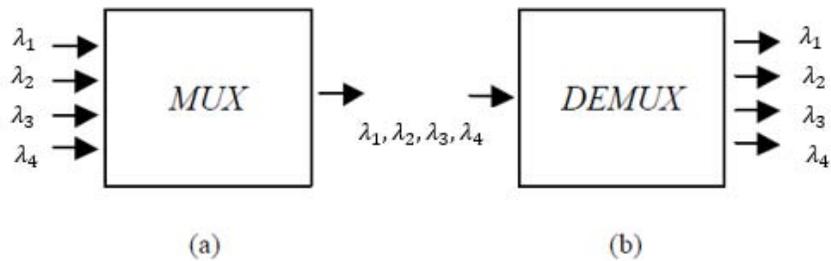


Figura 2.6 Esquema del funcionamiento de un (a) multiplexor y un (b) demultiplexor [1].

Las rejillas pueden emplearse en analizadores espectrales o también conocidos como Optical Spectrum Analyzers (OSA), los cuales monitorean la intensidad y estabilidad de cada canal WDM.

Dentro de las telecomunicaciones, las rejillas también se pueden encontrar en fuentes láser sintonizables para seleccionar la longitud de onda de salida, en aplicaciones de amplificación y compresión de pulsos láser, divisores de haz láser y como acopladores para fibra óptica.

### 2.3.4 Las rejillas de difracción en la actualidad

La alta precisión y calidad requeridas en las rejillas de difracción modernas dentro de los ámbitos técnico y científico han llevado al límite las condiciones de control de las dimensiones de las herramientas utilizadas en la fabricación de las mismas. Las máquinas que realizan el grabado de los sustratos, ya sea utilizando cuchillas de diamante o tecnología láser, así como las condiciones ambientales en las que se fabrican, tienen que mantenerse altamente controladas para obtener productos de gran calidad. El reto de producir rejillas ha llamado la atención de muchos técnicos y científicos alrededor del mundo, y sólo algunos grupos de trabajo han logrado obtener resultados exitosos, siempre limitados por la tecnología que se encuentre al alcance.

En la producción de nuevas rejillas de difracción se busca aumentar la eficiencia de difracción y al mismo tiempo disminuir la dependencia a la polarización. Se han logrado resultados satisfactorios para conseguir lo anterior y obtener un funcionamiento adecuado en amplios anchos de banda, por medio de la reducción de las reflexiones no deseadas de la superficie de la rejilla usando estructuras multicapas en los materiales de fabricación [9].

También se han hecho investigaciones en el área de materiales y procesos para optimizar el funcionamiento de las rejillas de difracción. Un ejemplo de esto, son los experimentos que se han realizado utilizando moldeado por compresión de estructuras microscópicas de polímeros. Los resultados han sido prometedores, obteniendo rejillas que funcionan eficientemente en transmisiones del orden de los Terahertz [10].

Otro de los retos que enfrentan, no solo las rejillas de difracción, sino toda la tecnología en la actualidad, es la necesidad de miniaturizar los dispositivos. Se han realizado investigaciones al respecto, y se ha logrado satisfactoriamente la integración de las rejillas de difracción en chips, compactándolas y obteniendo bajos niveles de consumo de energía, altas velocidades en respuesta y un funcionamiento óptimo a nivel espectral [11].

En el área de telecomunicaciones y dispositivos para comunicaciones ópticas, se investiga la integración de las rejillas en aplicaciones de multiplexación. Existen grupos de investigación que diseñan multiplexores y demultiplexores basados en rejillas de difracción cóncavas para tecnologías CWDM con aplicaciones en ROADMs, obteniendo bajas pérdidas de transmisión (<3.5 dB) y logrando longitudes de onda que encajan en los modelos estándar impuestos por la Unión Internacional de las Telecomunicaciones [12].

En la actualidad existen múltiples compañías en todo el mundo que se dedican a la investigación, producción, comercialización y distribución de numerosas tecnologías ópticas, entre ellas las rejillas de difracción, para diversos fines dentro de sectores académico, industrial y comercial. Se pueden llegar a encontrar diversas rejillas en el mercado, cubriendo una amplia gama de características, aplicaciones y costos. Mientras más especializada sea la aplicación para la que se requiere, más precisa es la rejilla y por lo tanto se utilizan materiales de mejor calidad y procesos de fabricación altamente controlados, elevando los precios significativamente.

Las rejillas de difracción con aplicación en telecomunicaciones son unas de las más especializadas, debido a que deben contar con una serie de especificaciones para poder integrarlas a un sistema de telecomunicaciones. La mayoría de rejillas no deben presentar dependencia de la polarización, trabajar en ciertos rangos de longitud de onda, especialmente en la segunda y tercer ventana de comunicaciones ópticas (en el rango de 1300 nm hasta 1700 nm), tener bajas pérdidas de inserción y por polarización (menores a 0.2dB), contar con altas eficiencias (arriba del 90%), tener una alta relación señal a ruido (SNR), poseer estabilidad a condiciones ambientales térmicas, vibración y factores de humedad, estar hechas con materiales electromagnéticamente compatibles (polímeros, cerámicas y otros materiales dieléctricos) y contar con grandes resistencias mecánicas y ambientales para obtener periodos de vida útil más largos.

En la Tabla 2.1 se muestra una comparativa de rejillas de difracción de diferentes empresas [13] que comercializan y ponen al alcance del mercado diferentes tipos de rejillas de difracción, con características especiales, procesos de fabricación de grabado u holográfico y sus respectivos costos actualizados en moneda nacional, junto con algunas aplicaciones recomendadas por cada una de las corporaciones. Esto con el fin de abrir un panorama actual del estado del arte en materia comercial de las rejillas de difracción más utilizadas mundialmente. Un punto importante a resaltar, es el hecho de que cada compañía ofrece cierto grado de personalización del producto para cumplir con las características que requiere la aplicación del mismo. Se pueden cambiar los materiales de los sustratos y de las capas reflejantes, el patrón de la rejilla, el rango de longitudes de onda en donde se tienen eficiencias más grandes, dimensiones físicas, etc.

**Tabla 2.1 Características básicas de algunas rejillas de difracción comerciales.**

Nombre de la compañía	Clases de Rejillas de Difracción	Características que pueden llegar a ofrecer	Procesos de fabricación	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>Anchor Optics</b>                      101 E. Gloucester Pike                      Barrington, NJ 08007                      USA                      Tel.: +1 856 573 6865  <a href="http://www.anchoroptics.com">www.anchoroptics.com</a></p>	<p>Rejilla de difracción holográfica (Película)</p>	<p>Películas de poliéster transparente                      Entre 500 y 1000 líneas/mm</p>	<p>Holográficos</p>	<p>Experimentos en espectroscopía</p>	<p>160-3950</p>
<p><b>Carl Zeiss Jena GmbH</b>                      Carl-Zeiss-Promenade 10                      07745 Jena                      Germany                      Tel.: +49 3641 64 26 46, e-mail: <a href="mailto:czejena@zeiss.de">czejena@zeiss.de</a>  <a href="http://www.zeiss.de/scjena">www.zeiss.de/scjena</a></p>	<p>Rejillas de difracción cóncavas</p>	<p>Materiales fotorresistentes, sílice fundido, vidrio, silicio, CaF<sub>2</sub>, etc                      Longitudes de onda entre 193 nm y 2µm                      Con capa anti reflejante o metalizada</p>	<p>Grabado y holográficos</p>	<p>Procesamiento de materiales, Cirugía láser, Sistemas de medición industrial</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>HOLOEYE Photonics AG</b>                      Albert-Einstein-Str. 14                      12489 Berlin-Adlershof                      Germany                      Tel.: +49 30 63 92 36 60  <a href="http://www.holoeye.com">www.holoeye.com</a></p>	<p>Rejillas de difracción con diferentes patrones</p>	<p>Materiales plásticos, vidrio, Polimetilo metacrilato PMMA y policarbonato                      Longitudes de onda entre 500 nm y 800 nm                      Patrones lineales, cruzados, puntos y especiales</p>	<p>Grabado y holográficos.</p>	<p>Pruebas experimentales en la industria e investigación.</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Ibsen Photonics A/S</b>                      Ryttermarken 15-21                      3520 Farum                      De nmark                      Tel.: +45 44 34 70 00  <a href="http://www.ibsen.dk">www.ibsen.dk</a></p>	<p>Rejillas de transmisión                      Rejillas PING (independientes de la polarización) para telecomunicaciones</p>	<p>Materiales dieléctricos                      Longitudes de onda entre 850 nm y 1600 nm                      Entre 900 y 1000 líneas/mm                      Altas eficiencias, estabilidad</p>	<p>Holográficos</p>	<p>Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM), Filtros sintonizables, Ecualesadores de ganancia dinámica, Multiplexores, Demultiplexores Optical Spectrum Analyzer (OSA), Espectrómetros</p>	<p>&gt;10 000</p>

Tabla 2.1 Características básicas de algunas rejillas de difracción comerciales. (continuación)

Nombre de la compañía	Clases de Rejillas de Difracción	Características que pueden llegar a ofrecer	Procesos de fabricación	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>Jenoptik Optical Systems GmbH</b>                      Goeschwitzer Strasse 25                      07745 Jena                      Germany                      Tel.: +49 3641 6 50  <a href="http://www.jenoptik.com/en-optical-systems">www.jenoptik.com/en-optical-systems</a></p>	<p>Rejillas en transmisión y reflexión.                       Rejillas para compresión de pulsos.                       “Blazed Gratings” (con patrón triangular)</p>	<p>Materiales como sílice fundido y dieléctricos.                       Longitudes de onda entre 600 y 1500 nm                       Entre 1480 y 1740 líneas/mm                       Altas eficiencias</p>	<p>Holográficos</p>	<p>Procesamiento industrial,                      Equipo médico,                      Creación de grism,                      Espectrómetros,                      Láser UV</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Knight Optical (UK) Ltd</b>                      Roebuck Business Park                      Harrietsham, Kent, ME17 1AB                      United Kingdom                      Tel.: +44 1622 85 9444  <a href="http://www.knightoptical.com">www.knightoptical.com</a></p>	<p>Rejillas holográficas                       Rejillas grabadas</p>	<p>Materiales dieléctricos                       Desde 100 a 2400 líneas/mm                       Longitudes de onda en el ultravioleta, visible e infrarrojo cercano</p>	<p>Grabado y holográficos</p>	<p>Espectrómetros,                      Pruebas industriales,                      Equipo médico,                      Instrumentación</p>	<p>500-3700</p>
<p><b>LightSmyth Technologies, Inc.</b>                      1720 Willow Creek Circle,                      Suite 520                      Eugene, OR 97402                      USA                      Tel.: +1 541 431 0026  <a href="http://www.lightsmyth.com">www.lightsmyth.com</a></p>	<p>Rejillas para compresión de pulsos                       Rejillas para telecomunicaciones                       Rejillas de reflexión                       Rejillas en películas nanométricas</p>	<p>Materiales dieléctricos                       Longitudes de onda entre 850 nm y 1512 nm                       Entre 940 y 1700 líneas/mm                       Pérdidas de inserción menores a 0.1 dB y pérdidas por polarización menores a 0.2 dB</p>	<p>Holográficos</p>	<p>Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM),                      Wavelength Selective Switching (WSS),                      Multiplexores,                      Demultiplexores                      Compresores de pulsos,                      Láseres de alta potencia,                      Sensores,                      Espectrómetros</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Midwest Laser Products, LL</b>                      P. O. Box 262                      Frankfort, IL 60423                      USA  <a href="http://www.midwest-laser.com">www.midwest-laser.com</a></p>	<p>Rejilla (Película holográfica)                       Rejillas para patrones de dos dimensiones</p>	<p>Materiales plásticos y vidrio</p>	<p>Holográficos</p>	<p>Aplicaciones para entretenimiento</p>	<p>80-7100</p>

**Tabla 2.1 Características básicas de algunas rejillas de difracción comerciales. (continuación)**

Nombre de la compañía	Clases de Rejillas de Difracción	Características que pueden llegar a ofrecer	Procesos de fabricación	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>Newport Corporation</b> 1791 Deere Avenue Irvine, CA 92606 USA Tel.: +1 949 863 3144 <a href="http://www.newport.com">www.newport.com</a></p>	<p>Rejillas de reflexión grabadas  Rejillas de reflexión holográficas</p>	<p>Materiales dieléctricos y sílice  Longitudes de onda entre 240 nm y 6000 nm  Desde 50 a 2400 líneas/mm  Capas reflejantes en aluminio y oro</p>	<p>Grabado y holográficos</p>	<p>Espectrómetros, Monocromadores</p>	<p>&gt;3600</p>
<p><b>Optometrics Corporation</b> 119 Russell Street Suite 10 Littleton, MA 10460 USA Tel.: +1 978 772 1700, e-mail: <a href="mailto:sales@optometrics.com">sales@optometrics.com</a> <a href="http://www.Optometrics.com">www.Optometrics.com</a></p>	<p>Rejillas de reflexión  Rejillas de transmisión</p>	<p>Materiales dieléctros, plásticos, vidrio borosilicato y sílice  Longitudes de onda entre 240 nm y 12000 nm  Desde 120-1800 líneas/mm  Capas reflejantes en oro</p>	<p>Grabado y holográficos</p>	<p>Instrumentación, Espectrómetros, Láseres, Filtros</p>	<p>800-2400</p>
<p><b>Spectrogon</b> Box 7071 187 12 Täby Sweden Tel.: +46 8 6 38 28 00 <a href="http://www.spectrogon.com">www.spectrogon.com</a></p>	<p>Rejillas planas  Rejillas cóncavas</p>	<p>Longitudes de onda entre UV y 2000 nm  Desde 600 a 3600 líneas/mm</p>	<p>Holográficos</p>	<p>Láseres sintonizables, Compresión de pulsos</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Spectrum Scientific, Inc.</b> 16692 Hale Avenue STE A Irvine, CA 92606 USA <a href="http://www.ssiptics.com/">www.ssiptics.com/</a></p>	<p>Rejillas holográficas  Rejillas grabadas  Rejillas para telecomunicaciones  Rejillas para compresión de pulsos</p>	<p>Longitudes de onda entre UV e infrarrojo cercano  Desde 120 a 2300 líneas/mm  Capas reflejantes de aluminio y oro</p>	<p>Grabado y holográficos</p>	<p>Uso en telecomunicaciones, Compresión de pulsos, Espectrómetros</p>	<p>1300-3000</p>

**Tabla 2.1 Características básicas de algunas rejillas de difracción comerciales. (continuación)**

Nombre de la compañía	Clases de Rejillas de Difracción	Características que pueden llegar a ofrecer	Procesos de fabricación	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>Thorlabs</b>                      56 Sparta Avenue                      Newton, NJ 07860                      USA                      Tel.: +1 973 300 3000, e-mail: <a href="mailto:sales@thorlabs.com">sales@thorlabs.com</a>  <a href="http://www.thorlabs.com">www.thorlabs.com</a></p>	<p>Rejillas de reflexión en UV, visible e infrarrojo cercano</p> <p>Rejillas de reflexión holográficas</p> <p>Rejillas Echelle</p> <p>Rejillas de transmisión en UV, visible e infrarrojo cercano</p>	<p>Longitudes de onda entre UV y &gt;3000 nm</p> <p>Desde 31 a 3600 líneas/mm</p> <p>Capas reflejantes de aluminio y oro</p>	<p>Grabado y holográficos</p>	<p>Espectrómetros,                      Uso en instalaciones experimentales, laboratorios e industria</p>	<p>670-4800</p>

## 2.4 Sistemas láser de amplio espectro

Fuentes láser de supercontinuo es otra forma de denominar a los sistemas láser de amplio espectro. El término de supercontinuo (SC) se empezó a utilizar ampliamente varios años después de su descubrimiento en 1969 y desde entonces se convirtió en un concepto de importancia debido a sus múltiples aplicaciones.

El supercontinuo es la generación de pulsos ultrarápidos de alta intensidad de luz blanca que abarcan un amplio ancho de banda espectral, desde el espectro ultravioleta hasta el infrarrojo cercano [14]. Esto se logra propagando pulsos ópticos del orden de los picosegundos o femtosegundos a través de un medio altamente no lineal condensado o gaseoso. El haz, al ser de luz blanca, posee múltiples longitudes de onda pero conserva las propiedades de un láser convencional monocromático, como la alta intensidad, la estabilidad en coherencia y la colimación del haz.

Son varios los procesos responsables de la generación de SC, como los llamados: Four Wave Mixing (FWM), Stimulated Raman Scattering (SRS), Self-Phase Modulation (SPM), Induced-Phase Modulation (IPM) y Cross-Phase Modulation (CPM o XPM) [14], los cuales son de los efectos no lineales involucrados en el proceso de generación de supercontinuo.

### 2.4.1 Efectos no lineales en sistemas de comunicaciones ópticas

A partir del año 2000 se han desarrollado muchos tipos de fibras ópticas, comúnmente denominadas como no lineales, tales como las fibras microestructuradas, las fibras holey y las fibras de cristales fotónicos. En todas ellas los efectos no lineales y las propiedades de dispersión son muy notables incluso desde longitudes de fibra de pocos centímetros, siendo de principal interés para aplicaciones en telecomunicaciones, tomografía y metrología [15].

Los efectos no lineales son dependientes de la intensidad de la radiación continua o de los pulsos propagados. En una fibra óptica, el haz de luz propagado a través de distancias considerables, es siempre confinado en una pequeña región transversal, haciendo que incluso potencias ópticas moderadas se conviertan en intensidades ópticas muy altas. Esto produce los efectos no lineales y es especialmente el caso de las fibras utilizadas para transmitir pulsos ultracortos.

Las no linealidades en fibras ópticas pueden ocurrir debido a un cambio en el índice de refracción del medio en función de la intensidad o por el fenómeno de dispersión inelástica [16] (donde la longitud de onda no se conserva). El cambio de índice de refracción es explicado por medio del denominado efecto Kerr, el cual es un efecto no lineal que sucede cuando un haz de luz con alta intensidad se propaga en un medio (condensado o gaseoso), ocurre una polarización del medio de tipo no lineal y se modifican las propiedades de propagación de la luz.

Las no linealidades de tipo efecto Kerr se pueden manifestar en tres diferentes efectos, denominados Self-Phase Modulation (SPM), Cross-Phase Modulation (CPM o XPM) y Four Wave Mixing (FWM). La dispersión inelástica puede inducir efectos como el Stimulated Brillouin-Scattering (SBS) y el Stimulated Raman-Scattering (SRS) [16]. En la Figura 2.7 puede observarse un diagrama de clasificación de los diferentes efectos no lineales en fibras ópticas.

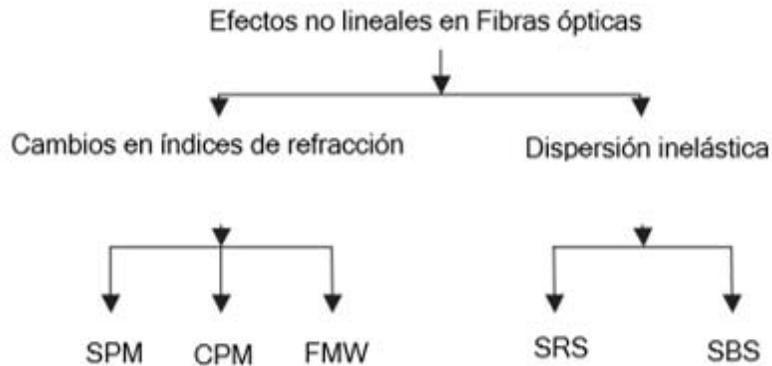


Figura 2.7. Efectos no lineales en fibras ópticas [16].

Algunos efectos no lineales en sistemas de comunicaciones provocan un aumento de ganancia en canales ópticos debido a la disminución de potencia en otros. Los efectos no lineales pueden afectar solamente la fase de las señales, aumentando la dispersión y causando un ensanchamiento espectral considerable.

Para generar un amplio espectro se hace uso de diversos efectos no lineales, uno de ellos es conocido como Self-Phase Modulation (SPM). SPM se refiere al proceso que se crea cuando un haz láser interactúa con el medio en el que se propaga, ocasionando un cambio en el índice de refracción del material. Esto puede ser descrito matemáticamente como [17]:

$$\Delta n = n_2 I \quad (2.1)$$

En donde el índice de refracción no lineal es  $n_2$  y la intensidad óptica es  $I$ .

El origen físico del fenómeno se basa en un cambio de gran magnitud en el índice de refracción del medio de propagación dependiente de la intensidad. En el caso de un láser pulsado, la variación temporal que ocasiona la intensidad del láser, lleva a algo conocido como SPM en el tiempo, el cual se necesita para el ensanchamiento espectral. Cuando los pulsos se encuentran en el rango de los femtosegundos, el ensanchamiento para la generación de supercontinuo es causado principalmente por el efecto SPM [14].

La modulación de fase cruzada o Cross-Phase Modulation (CPM) es el mecanismo principal responsable del ensanchamiento de pulsos de picosegundos y femtosegundos. CPM se refiere al cambio no lineal de fase de un campo óptico inducido por otro campo que tiene diferente longitud de onda, dirección o estado de polarización [16]. Cuando un pulso ultracorto se propaga en un medio, se produce un cambio en el índice de refracción. La modulación en fase se puede originar por un solo pulso (SPM) o puede deberse a un pulso copropagado (CPM).

En otros términos la modulación de fase cruzada, es el cambio de fase de un haz de luz causado por la interacción de otro haz en un medio no lineal, traduciéndose en un cambio de índice de refracción del material. Se puede describir matemáticamente como [18]:

$$\Delta n^{(2)} = 2n_2 I^{(1)} \quad (2.2)$$

En donde  $n_2$  es el índice de refracción no lineal y la intensidad óptica  $I^{(1)}$  del haz de luz 1 causa el cambio de índice de refracción al haz de luz 2.

El efecto CPM se presenta siempre acompañado del efecto no lineal Self-Phase Modulation. Para campos ópticos de igual magnitud pero diferente longitud de onda, la contribución del efecto no lineal al cambio de fase es dos veces la aportación que hace el efecto SPM.

El último de los efectos no lineales que interactúan de forma directa en el índice de refracción es el llamado Four Wave Mixing (FWM) o Four-Photon Mixing. Se puede entender como un fenómeno de intermodulación en el campo óptico. También es un tipo de efecto Kerr y ocurre cuando dos o más haces de luz con diferentes longitudes de onda son enviadas en una fibra óptica [19].

El efecto FWM, como se observa en la Figura 2.8, ocurre si al menos dos componentes de frecuencia distintas  $\nu_1$  y  $\nu_2$  (con  $\nu_2 > \nu_1$ ) se propagan en un medio no lineal, como la fibra óptica, creando dos componentes de frecuencia adicionales, descritas matemáticamente como [20]:

$$\nu_3 = \nu_1 - (\nu_2 - \nu_1) = 2\nu_1 - \nu_2 \quad (2.3)$$

$$\nu_4 = \nu_2 + (\nu_2 - \nu_1) = 2\nu_2 - \nu_1 \quad (2.4)$$

Las diferentes longitudes de onda que son transportadas por el mismo medio, son los diferentes canales en un sistema multiplexado por división de longitud de onda o en su caso, los diferentes modos provenientes de un solo láser transmisor.

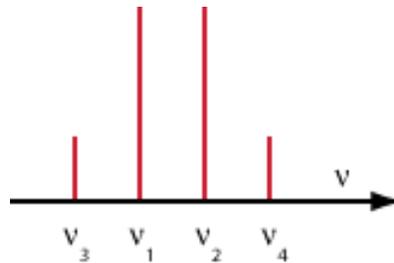


Figura 2.8 Generación de componentes de frecuencia en FWM [19].

Los efectos no lineales inelásticos son denominados así, porque existe una transferencia de energía entre el campo óptico hacia el medio no lineal. Existen dos importantes efectos que cumplen con esta condición y son conocidos como dispersión Raman estimulada o Stimulated Raman Scattering (SRS) y dispersión Brillouin estimulada o Stimulated Brillouin Scattering (SBS).

Una respuesta del medio frente a un haz de luz de alta intensidad es la vibración, y si esta es asociada a partículas ópticas, el fenómeno es llamado dispersión Raman. Este efecto en particular ocurre cuando dos o más haces luminosos con diferentes longitudes de onda se propagan en un medio y la longitud de onda más alta (llamada Onda de Stokes) experimenta una amplificación óptica a expensas de la longitud de onda más pequeña [21].

La dispersión Raman estimulada o Stimulated Raman Scattering (SRS) compite en importancia con SPM en la generación de supercontinuo. La interferencia entre estos dos efectos provoca un cambio en la emisión espectral resultante.

Finalmente, en la generación de supercontinuo se encuentra involucrada también la modulación de fase inducida o Induced Phase Modulation (IPM) que es un efecto no lineal relacionado con el efecto CPM. Ocurre cuando un pulso débil (por lo general un pulso de

prueba) se envía a través de un medio cuyo índice de refracción ha sido previamente modificado debido a la propagación de un pulso de muy alta intensidad y la fase del pulso de prueba puede ser modulado por medio de la variación del índice no lineal de refracción.

Por las aplicaciones que tienen, los efectos no lineales en fibras ópticas se han convertido actualmente en un área académica de investigación muy sobresaliente [15]. Los fenómenos no lineales juegan un rol muy importante en el diseño de sistemas ópticos de altas capacidades de transmisión y por las propiedades de las fibras ópticas para telecomunicaciones, las no linealidades adquieren efectos más notorios.

#### **2.4.2 Aplicaciones de los sistemas láser de amplio espectro**

Desde la década de los 90's las redes de telecomunicaciones empezaron a implementar la transmisión de varias longitudes de onda sobre una sola fibra óptica [22]. Un claro ejemplo, es la técnica de multiplexación por división de longitud de onda densa o DWDM por sus siglas en inglés, la cual transmite diferentes canales al mismo tiempo por la fibra óptica por medio de diferentes longitudes de onda portadoras. A esto se une el uso de amplificadores, el aumento de las distancias de transmisión y la disminución de la atenuación en fibras ópticas modernas, provocando que los efectos no lineales tengan un impacto muy grande en las comunicaciones.

Las no linealidades además, son parte fundamental de los sistemas ópticos ultrarápidos, ya que se aprovechan las propiedades de cada efecto no lineal que ocurren al presentarse altas intensidades y varias longitudes de onda confinadas dentro de una misma fibra y algunos ejemplos aplicados a sistemas ópticos para comunicación son los conversores de longitud de onda, amplificadores Raman, Brillouin, paramétricos y por supuesto, la emisión de amplio espectro.

Después del descubrimiento de la generación de SC, algunas de las primeras aplicaciones aparecieron dentro del campo de la absorción y excitación de la luz en la espectroscopia para el estudio de diversos procesos del orden de los picosegundos y femtosegundos que se llevan a cabo en la biología, en la química y en la física. Por ejemplo, se estudió la fotosíntesis, procesos de la visión, caracterización de materiales, reacciones químicas, procesos no radiactivos, el movimiento de partículas en materiales semiconductores, etc.

Con la llegada de las fibras microestructuradas nuevas aplicaciones surgieron para el campo del SC, tales como relojes de sistemas digitales, sistemas de control, estabilizadores de fase, tomografía coherente óptica, compresión de pulsos ultracortos, comunicaciones ópticas, tecnología LIDAR, ciencia atmosférica, procesamiento de imágenes, imágenes 3D y diagnósticos médicos, entre otras [14].

En telecomunicaciones, los sistemas SC empezaron a llamar la atención a partir de 1990 [15], la gran demanda por sistemas de comunicaciones ópticas con grandes capacidades a nivel mundial ha hecho que se incorporen técnicas de multiplexación a nivel longitud de onda y temporal, para incrementar la eficiencia de las redes ópticas para comunicaciones. Actualmente el hecho de tener pulsos ópticos más cortos significa poder comprimir más información en un determinado intervalo de tiempo, por lo que la transmisión de datos aumenta hasta lograr tasas de transmisión del orden de Terabits/s y Pentabits/s.

La técnica WDM, requiere de una fuente láser con un ancho de banda espectral estrecho para cada canal [15]. También se requiere de un espaciamiento entre canales, que es una

cantidad impuesta de tal manera que no hay traslape o interferencia entre canales adyacentes. El uso de fuentes láser individuales para cada canal deja de ser práctico cuando el número de canales va en aumento, por lo que se observó que una fuente de SC podría llegar a ser de gran utilidad al poseer un rango espectral sumamente amplio. Se desarrollaron fibras ópticas no lineales para probar fuentes experimentales para sistemas WDM basadas en sistemas láser de amplio espectro, dando como resultado transmisores capaces de proveer más de 1000 canales [15], ya que los sistemas láser de SC pueden llegar a generar más de 1000 modos ópticos longitudinales manteniendo su coherencia. [14]

### **2.4.3 Los sistemas láser de amplio espectro en la actualidad**

Varias de las investigaciones recientes en sistemas láser SC han sido llevadas a cabo por grupos científicos de Japón. Se han logrado transmisiones de hasta 3.24 Tbits/s en distancias de 80 km, usando un número limitado de canales (81) en longitud de onda usando el SC. Se supo además, de la necesidad de usar pulsos del orden de 30 fs para conseguir periodos de bit de 1 ps y transmisiones de Pentabits/s a lo largo de decenas de kilómetros [14].

Se sabe que los láseres de amplio espectro de tipo mode-locked, los cuales emiten pulsos ultracortos por un método en donde existe un resonador con un elemento activo (moduladores) o con un elemento pasivo no lineal, ofrecen altas eficiencias en cuanto a la generación de canales en longitud de onda y temporales por su característica de producir miles de frecuencias manteniendo la coherencia en cada pulso. Sin embargo aún existen muchos retos para mejorar las velocidades, reducir el periodo de bit al orden de los picosegundos e incrementar el número de longitudes de onda conservando la coherencia.

En la Tabla 2.2 se muestra una comparativa de diferentes empresas [23] que comercializan con sistemas láser de amplio espectro en diferentes partes del mundo, colocando en el mercado distintos sistemas con múltiples características. Se muestran aplicaciones recomendadas y precios actualizados en moneda nacional. Algunas de las corporaciones proporcionan sistemas completos y otras proporcionan la instrumentación necesaria para construir una fuente de generación de supercontinuo. La mayor parte de las organizaciones dedicadas a la distribución de tecnología óptica de este tipo, ofrece una personalización de cada sistema, dando como resultado láseres con especificaciones técnicas y costos con un rango muy amplio. Algunas de las características que se pueden cambiar de acuerdo a la aplicación deseada son: las potencias de salida del láser, las terminaciones y conectores, la frecuencia de operación, la polarización del haz, ajustes del rango espectral y dimensiones físicas externas del sistema láser.

**Tabla 2.2 Características básicas de algunos sistemas láser comerciales de amplio espectro.**

Nombre de la compañía	Modelos de sistemas láser de amplio espectro	Especificaciones	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>AdValue Photonics</b>                      3440 E. Britannia Drive,                      Suite 190                      Tucson, AZ 85706                      USA                      Tel.: +1 520 790 5468, e-mail: <a href="mailto:contact@advaluephotonics.com">contact@advaluephotonics.com</a>  <a href="http://www.advaluephotonics.com">www.advaluephotonics.com</a></p>	<p>Broadband Mid-IR Light Source (AP-SC-MIR)</p>	<p>Longitudes de onda entre 1900 y 2400 nm.                      100 mW de potencia a la salida                      Operación a 10kHz                      No polarizado                      Conectores FC/APC</p>	<p>Prueba de componentes ópticos, análisis de elementos gaseosos, análisis biomédicos, espectrometría, investigación y desarrollo</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Fianium</b>                      20 Compass Point                      Ensign Way                      Southampton SO31 4RA                      United Kingdom                      Tel.: +44 2380 45 8776  <a href="http://www.fianium.com">www.fianium.com</a></p>	<p>WhiteLase SC480 (Ultra High-Power Supercontinuum Fiber Laser)                      WhiteLase SC Series Blue &amp; UV enhanced Supercontinuum Fiber Lasers                      WhiteLase OEM (Industrial Supercontinuum Fiber Laser)                      WhiteLase micro Compact Supercontinuum</p>	<p>Longitudes de onda entre 300 y 2400 nm                      Desde 200mW hasta 20W                      Diversas tasas de repetición que van desde 100kHz                      No polarizado</p>	<p>Imagenología con fluorescencia, microscopía con fluorescencia en reflexión total interna, imagenología molecular, espectrometría en banda ancha, tomografías, nanofotónica, Inspección industrial</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Keopsys SA</b>                      Headquarters                      2 rue Paul Sabatier                      22300 Lannion                      France                      Tel.: +33 2 96 05 08 00  <a href="http://www.keopsys.com">www.keopsys.com</a></p>	<p>PEFL-KULT series</p>	<p>Longitudes de onda hasta 1500 nm                      Potencias hasta 15kW                      Tasas de repetición entre 10Hz y 1MHz                      Polarización lineal o no polarizados</p>	<p>Telemetría, detección de rangos, escaneo 3D, mapeo, sensores climáticos</p>	<p>Variable por cotización</p>

Tabla 2.2 Características básicas de algunos sistemas láser comerciales de amplio espectro. (continuación)

Nombre de la compañía	Modelos de sistemas láser de amplio espectro	Especificaciones	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>LEUKOS</b> 37 rue Henri Giffard, Z.I. Nord 87280 Limoges France Tel.: +33 5 87 20 00 25, e-mail: <a href="mailto:contactus@leukos-systems.com">contactus@leukos-systems.com</a> <a href="http://www.leukos-systems.com">www.leukos-systems.com</a></p>	<p>Sistemas genéricos (UV-VIS-NIR)  Sistemas de potencia media  Sistemas de alta potencia  Sistemas en infrarrojo cercano y medio</p>	<p>Longitudes de onda entre 320 nm y 2800 nm  Desde 50mW a 4W de potencia de salida.  Tasas de repetición desde 30kHz</p>	<p>Espectrometría, imagenología, tecnología LIDAR, pruebas de componentes ópticos</p>	<p>&lt;160 000</p>
<p><b>Menlo Systems GmbH</b> Am Klopferspitz 19a 82152 Martinsried Germany Tel.: +49 89 1 89 16 60 <a href="http://www.menlosystems.com">www.menlosystems.com</a></p>	<p>C-Fiber Femtosecond Erbium Laser</p>	<p>Longitudes de onda entre 500 y 2200 nm  Desde 350mW de potencia de salida  Tasas de repetición desde 100Hz  Polarización lineal</p>	<p>Sincronización, espectrometría, tomografía óptica, caracterización de materiales, testeo de sistemas de telecomunicaciones</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Nano-Giga</b> 137 avenue Anatole France, 94600 Choisy le Roi France Tel.: +33 1 71 36 05 63, e-mail: <a href="mailto:info@nano-giga.fr">info@nano-giga.fr</a> <a href="http://www.nano-giga.fr">www.nano-giga.fr</a></p>	<p>UC INSTRUEMNTS' CA9035</p>	<p>Longitudes de onda entre 500 y 2200 nm  Desde 800mW de potencia de salida.  Conectores FC/PC</p>	<p>Caracterización de componentes ópticos para comunicaciones, tomografía óptica, sensores de fibra óptica, espectrometría</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Newport Corporation</b> 1791 Deere Avenue Irvine, CA 92606 USA Tel.: +1 949 863 3144 <a href="http://www.newport.com">www.newport.com</a></p>	<p>Supercontinuum generation kit</p>	<p>Longitudes de onda entre 400 y 1600 nm  Desde 50mW de potencia de salida  Tasas de repetición desde 80MHz  No polarizado</p>	<p>Espectrometría, tomografía óptica, caracterización de componentes ópticos</p>	<p>&gt;15 600</p>

Tabla 2.2 Características básicas de algunos sistemas láser comerciales de amplio espectro. (continuación)

Nombre de la compañía	Modelos de sistemas láser de amplio espectro	Especificaciones	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>NKT Photonics</b>                      Blokken 84                      3460 Birkerød                      De nmark                      Tel.: +45 4348 39 00  <a href="http://www.nktphotonics.com">www.nktphotonics.com</a></p>	<p>SuperK EXTREME                      supercontinuum lasers</p> <p>SuperK COMPACT                      supercontinuum lasers</p>	<p>Longitudes de onda entre 400 y 2400 nm</p> <p>Desde 100mW de potencia de salida</p> <p>Tasas de repetición desde 20kHz</p> <p>No polarizado</p> <p>Conectores FC/PC, FC/APC, colimador</p>	<p>Caracterización de componentes, espectrometría, uso en laboratorio, test y mediciones</p>	<p>&gt;70 000</p>
<p><b>Nuphoton Technologies</b>                      41610 Corning Place                      Murrieta, CA 92562                      USA                      Tel.: +1 951 696 8366 ext 102  <a href="http://www.nuphoton.com">www.nuphoton.com</a></p>	<p>Supercontinuum Source ,                      Type SC-2W</p>	<p>Longitudes de onda entre 500 y 2200 nm</p> <p>Entre 1.5 y 2W de potencia de salida</p> <p>Conectores FC/APC</p>	<p>Pruebas de laboratorio, mediciones, sensores</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>PolarOnyx</b>                      470 Lakeside Drive, Suite F                      Sunnyvale CA 94085                      USA                      Tel.: +1 408 573 0930  <a href="http://www.polaronyx.com">www.polaronyx.com</a></p>	<p>Láseres de supercontinuo series Pluto</p> <p>Láseres supercontinuos en infrarrojo y UV.</p>	<p>Longitudes de onda entre 450 y 2400 nm</p> <p>5W de potencia de salida</p> <p>Tasa de repetición entre 1 y 200 MHz</p>	<p>Investigación y desarrollo biomédico, instrumentación y mediciones, investigación de fenómenos ultrarápidos, espectrometría y microscopía</p>	<p>Variable por cotización</p>
<p><b>Thorlabs</b>                      56 Sparta Avenue                      Newton, NJ 07860                      USA                      Tel.: +1 973 300 3000, e-mail: <a href="mailto:sales@thorlabs.com">sales@thorlabs.com</a>  <a href="http://www.thorlabs.com">www.thorlabs.com</a></p>	<p>Supercontinuum Generation Kit</p>	<p>Longitudes de onda entre el rango visible y el infrarrojo cercano</p> <p>Desde 150mW de potencia de salida</p> <p>Tasa de repetición desde 85MHz</p>	<p>Microscopía, espectrometría, caraterización de componentes ópticos</p>	<p>&gt;14 000</p>

Tabla 2.2 Características básicas de algunos sistemas láser comerciales de amplio espectro. (continuación)

Nombre de la compañía	Modelos de sistemas láser de amplio espectro	Especificaciones	Aplicaciones recomendadas	Costos (pesos MX)
<p><b>TOPTICA Photonics AG</b></p> <p>Lochhamer Schlag 19 82166 Gräfelfing Germany Tel.: +49 89 85 83 70, e-mail: <a href="mailto:info@toptica.com">info@toptica.com</a> <a href="http://www.toptica.de">www.toptica.de</a></p>	<p>FemtoFiber pro SCIR</p> <p>FemtoFiber pro UCP</p>	<p>Longitudes de onda entre 980 y 2200 nm</p> <p>Desde 30mW de potencia de salida</p> <p>Tasas de repetición entre 40 y 80MHz</p> <p>Polarización lineal</p>	<p>Tomografía, metrología</p>	<p>Variable por cotización</p>

## 2.5 Rejillas de difracción basadas en arreglos de fibra óptica

Como ya se ha mencionado, las rejillas de difracción tienen múltiples aplicaciones y pueden clasificarse dependiendo de sus características y finalidades. En algunas de estas aplicaciones se requieren altas eficiencias de difracción y un patrón de intensidad uniforme. Ejemplos conocidos en donde se necesitan tales características son las aplicaciones en comunicaciones ópticas, reconocimiento de patrones e imagenología.

Existen investigaciones que exploran un tipo de rejilla de difracción hecha a base de fibra óptica, la cual muestra un comportamiento estable, alta eficiencia y un patrón de intensidad uniforme [24]. Estas rejillas de difracción se han realizado con arreglos de fibras ópticas ultra delgadas de  $25\mu\text{m}$  de diámetro, colocadas adyacentemente unas de otras. Al incidir una onda plana perpendicularmente al arreglo, cada una de las fibras actúa como un lente cilíndrico y concentra a la onda incidente detrás de la rejilla. El modelo y el patrón de distribución que se han obtenido se muestran en la Figura 2.9.

La experimentación con este tipo de rejillas se ha llevado a cabo con un láser monocromático de  $632.8\text{ nm}$  de longitud de onda y se demostró una distribución de intensidad uniforme. Véase Figura 2.10. Las rejillas de difracción de fibra óptica propuestas mostraron además comportamientos útiles para la obtención de patrones en dos dimensiones al cruzar dos arreglos de fibras [24], y se recomienda su uso experimental para aplicaciones en codificadores ópticos [25].

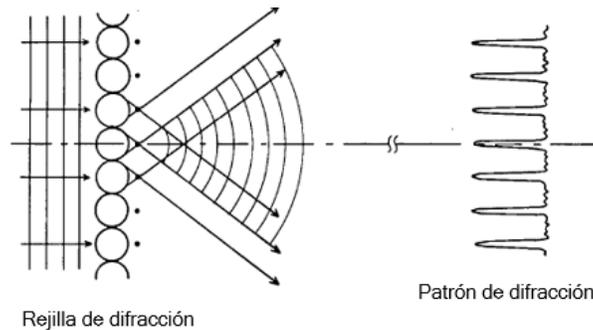


Figura 2.9 Rejilla de difracción formada por un arreglo de fibras ópticas [24].

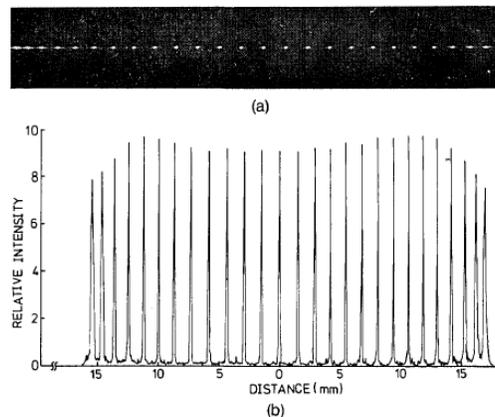


Figura 2.10 Patrón de difracción de una rejilla de fibras ópticas: (a) fotografía y (b) distribución de intensidad [24].

Las fibras ópticas utilizadas para realizar rejillas de difracción funcionan como lentes cilíndricos convexos de superficie lisa, que concentra los rayos de luz colimados en un punto focal, como se puede apreciar en la Figura 2.11. Una vez que los haces de luz se concentran, se convierten en fuentes puntuales de frentes de onda nuevos que interfieren unos con otros, realizándose por consiguiente el efecto de difracción. La fibra óptica puede en este caso modelarse como un dispositivo refractor, es decir, una discontinuidad en el medio dominante, que reconfigura la distribución de la energía emitida [24].

Las ondas planas que inciden en la primer interfaz hacia adentro de la lente convergen hacia el eje curvándolas en la segunda interfaz. Una serie de rayos colimados son redirigidos de esta forma hacia un punto focal. Para esta clase de lentes se puede utilizar una aproximación con base en el modelo de la Figura 2.12 [26]:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{(n-1)^2 d}{nR_1R_2} \quad (2.5)$$

En donde  $n$  es el índice de refracción del material del lente,  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de curvatura de ambas interfaces y  $d$  es igual a la potencia dióptrica. En el caso de un lente cilíndrico ambas interfaces tienen el mismo radio de curvatura y cuando  $d=0$  se puede obtener la distancia efectiva focal  $F$ .

Las fibras ópticas pueden presentar diversas características: diferentes diámetros, geometrías internas, índices de refracción, materiales de fabricación, etc. Por lo tanto, se prevé que los efectos del fenómeno de difracción serían diferentes para cada tipo de fibra óptica al utilizarse en un arreglo adyacente. Por ejemplo, las rejillas de difracción elaboradas con fibras ópticas del mismo diámetro pero con diferentes índices de refracción, tendrían comportamientos distintos al hacer variar el punto focal en donde se concentran los haces incidentes. Teóricamente el efecto de difracción producido por fibras ópticas dependería de las características geométricas que tengan y del índice de refracción de sus materiales.

Los lentes cilíndricos pueden unirse y formar arreglos, usualmente llamados lenticulares o arreglos de micro lentes. En investigaciones recientes se ha probado su efectividad en conjunto con rejillas de difracción para aplicaciones tecnológicas en colorimetría y separación de longitudes de onda visibles [27].

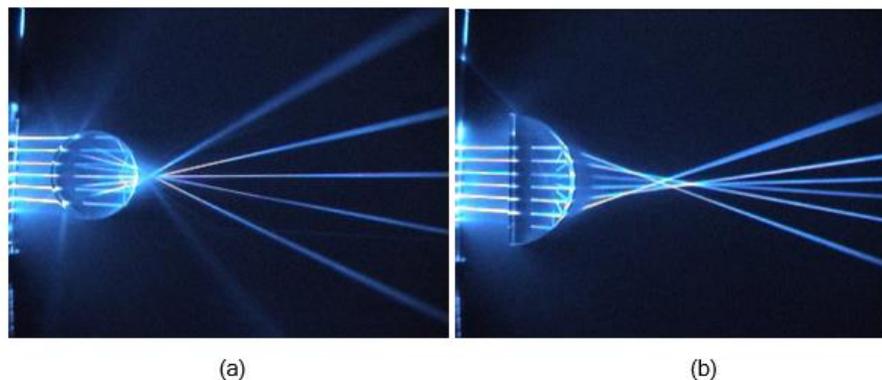


Figura 2.11 Lentes convexas (a) cilíndrico y (b) plano-cilíndrico [28].

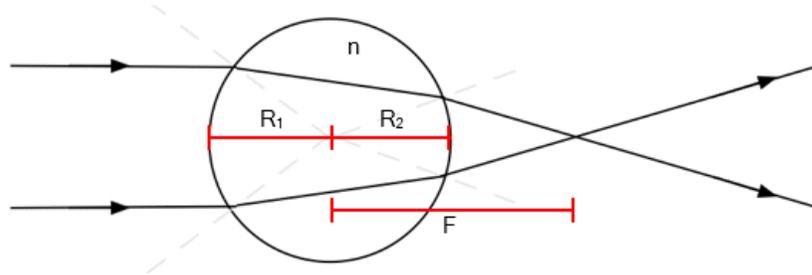


Figura 2.12 Geometría de un lente cilíndrico.

Existen investigaciones que exploran arreglos de micro lentes de diámetros  $<1$  mm [29] y micro lentes plano-cilíndricos [30] que funcionan como divisores de haces de luz. Estas investigaciones comparan a los arreglos de micro lentes con las rejillas de difracción hechas de arreglos de fibra óptica, ya que ambos elementos ópticos producen múltiples órdenes de difracción por medio del efecto de interferencia. Las aplicaciones de estos dispositivos incluyen imagenología múltiple e iluminación de dispositivos ópticos u optoelectrónicos y los arreglos de lentes plano-cilíndricos, se han llegado a recomendar como multiplexores con aplicación en reconocimiento de patrones y procesamiento de imágenes [31].

Se han estudiado rejillas de difracción holográficas con perfiles cónicos [32] y senoidales [33] tomando como base el modelo de rejillas hechas con cilindros de materiales dieléctricos, demostrando tener eficiencias altas y patrones de difracción con intensidades uniformes, comportamientos muy similares a los de las rejillas de fibra óptica. Este tipo de rejillas holográficas se proponen como solución en sistemas de visión en robótica debido a su emisión de múltiples órdenes de difracción a partir de un solo haz de luz incidente.

Por otra parte, también existen investigaciones que estudian los cambios en la dispersión que generan los cuerpos cilíndricos hechos de materiales dieléctricos como las fibras ópticas, al cambiar la distancia que los separa. La investigación en estos casos no tiene como objetivo analizar la difracción que se produce, sino que considera la incidencia de un haz luminoso en un costado del arreglo de cuerpos cilíndricos, observando el comportamiento de la dispersión de la luz cuando pasa de un cuerpo a otro a lo largo de todo el arreglo [34].

Sin embargo, existen datos de investigaciones que sí consideran la difracción que producen los arreglos de estos cuerpos cilíndricos. En estas investigaciones se utilizan cilindros de material dieléctrico de 20 y 50  $\mu\text{m}$  de diámetro y se les incide láseres de  $\lambda=488$  nm y  $\lambda=632$  nm. Se presentan en estos estudios una expresión matemática aproximada para calcular la eficiencia del orden cero. Se prueba además, que el máximo de eficiencia se localiza en este orden y que la intensidad disminuye ligeramente al repartirse de manera uniforme en los órdenes más altos [35].

Se han utilizado experimentalmente rejillas de difracción de fibra óptica, aprovechando su habilidad para emitir múltiples rayos de luz de intensidad uniforme con eficiencias altas. Se utilizó para esto un láser de  $\lambda=488$  nm. Estas rejillas se proponen como parte de un laparoscopio para medir la longitud de las lesiones en el hígado [36].

Otras aplicaciones de las rejillas de fibra óptica incluyen sensores para uso médico y de prevención de desastres [37-38]. Estas investigaciones aprovechan los múltiples haces difractados de alta intensidad provenientes de la rejilla, utilizan la información visual que

proporcionan [39] y los implementan en vez de una cámara para la detección de movimiento, respiración, ritmo cardíaco, etc.

Las rejillas de difracción basadas en arreglos adyacentes de fibras ópticas se han explorado experimentalmente y no hay ejemplares existentes comerciales. Dentro de las investigaciones que las utilizan se han realizado estudios para determinar uniformidad en el patrón de intensidad así como eficiencia y estabilidad, sin embargo no existen datos acerca del comportamiento de sus parámetros en rangos espectrales como el ultravioleta, visible o infrarrojo utilizando diferentes fuentes luminosas. Tampoco se encontraron estudios que exploren a las rejillas de difracción elaboradas con distintos tipos de fibra óptica. La presente investigación tiene como fin obtener el comportamiento de los parámetros principales de distintas rejillas de difracción de fibra óptica, utilizando además fuentes láser monocromáticas y de SC para la experimentación, analizando los datos obtenidos dentro del espectro visible, concluyendo y proporcionando recomendaciones para su posterior utilización.

## **2.6 Conclusiones**

En este capítulo se presentaron conceptos básicos de rejillas de difracción, incluyendo definiciones, características, métodos de fabricación comerciales, clasificación, retos de la tecnología y aplicaciones, así como definiciones de fuentes láser de amplio espectro y de efectos no lineales que participan en su funcionamiento, incluyendo también aplicaciones y dificultades que enfrentan, sirviendo como base para entender lo que se realiza a lo largo de este estudio. Se ha fundamentado la amplia variedad de aplicaciones que tienen los sistemas láser de amplio espectro y de las rejillas de difracción como solución en demultiplexado en diferentes ramas de la ciencia, resultando ser un campo de investigación muy explorable.

Las rejillas de difracción que se encuentran actualmente en el mercado son producidas en grandes cantidades, pero pueden personalizarse para ser de utilidad en aplicaciones particulares. Mientras más personalizada y precisa sea la rejilla, más costosos serán los materiales y los métodos de fabricación utilizados.

Por esto es importante encontrar nuevas variantes de rejillas de difracción para aplicaciones en telecomunicaciones y aprovechar las fuentes SC en los sistemas WDM y DWDM. Sería de gran importancia encontrar variantes más económicas, menos delicadas en cuanto a manejo y de fácil acceso para aplicaciones menos demandantes, que además sigan conservando su estabilidad y eficiencia en rangos espectrales amplios.

Las rejillas de difracción basadas en arreglos de fibras ópticas tienen propiedades especiales, que puedan ser útiles en diversas aplicaciones, en particular en lo relacionado al uso de las fuentes SC en sistemas de comunicaciones ópticas. Sin embargo, las investigaciones sobre este tipo de rejilla se encuentran en su fase inicial.

Por esto, el presente trabajo presenta la investigación teórica y experimental de las propiedades de las nuevas rejillas de difracción basados en arreglos de fibras ópticas, con un enfoque especial a sus potenciales aplicaciones con las fuentes de supercontinuo, en los sistemas de telecomunicaciones.

En capítulos siguientes, se presentan los elementos esenciales de la teoría de la rejillas de difracción y sus características. Luego se hace el modelado de algunas variantes de dichas

rejillas, se realiza la fabricación de muestras de las rejillas de diferentes tipos de fibras ópticas y se hace un estudio experimental de sus propiedades utilizando diversos tipos de fuentes ópticas monocromáticas y SC.

## 2.7 Referencias del capítulo 2

- [1] Palmer, C., & Loewen, E. (2005). *Diffraction grating handbook* (6th ed., pp. 14-15, 41, 51, 59, 203, 205-206, 209, 214-218). Rochester, NY: Richardson Grating Laboratory.
- [2] Zatmeniyе2015.com,. (2015). *Hologram diffraction pattern - Patterns Collection*. Revisado el 30 Julio 2015, disponible en: <http://zatmeniyе2015.com/hologram-diffraction-pattern/>
- [3] Paschotta, D. (2015). *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - diffraction gratings, reflection, transmission gratings, diffraction orders, output angles, Littrow configuration, high diffraction efficiency, fabrication methods, applications. Rp-photonics.com*. Revisado el 29 Julio 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/diffraction\\_gratings.html](http://www.rp-photonics.com/diffraction_gratings.html)
- [4] Nikon.com,. (2015). *Nikon / Recollections / Ruling Engine No. 1*. Revisado el 29 Julio 2015, disponible en: [http://nikon.com/about/feelnikon/recollections/r12\\_e/](http://nikon.com/about/feelnikon/recollections/r12_e/)
- [5] Hitachi-hta.com,. (2015). *Plane Gratings*. Revisado el 29 Julio 2015, disponible en: <http://hitachi-hta.com/products/life-sciences-chemical-analysis/diffraction-gratings/plane-gratings>
- [6] Ssiptics.com,. (2015). *Terms and Definitions*. Revisado el 29 Julio 2015, disponible en: [http://ssiptics.com/cart/index.php?dispatch=pages.view&page\\_id=31](http://ssiptics.com/cart/index.php?dispatch=pages.view&page_id=31)
- [7] Tekniker.es,. (2015). *Nanoimprinting lithography on 200 mm wafers for optical applications - ik4-tekniker*. Revisado el 2 Agosto 2015, disponible en: <http://www.tekniker.es/es/nanoimprinting-lithography-on-200-mm-wafers-for-optical-applications>
- [8] Snl.mit.edu,. (2015). *Advanced Diffraction Gratings - Space Nanotechnology Laboratory*. Revisado el 29 Julio 2015, disponible en: [http://snl.mit.edu/?page\\_id=46](http://snl.mit.edu/?page_id=46)
- [9] Yousefi, R., & Zarifkar, A. (2008). A NEW BINARY MULTI-LAYER DIFFRACTION GRATING. *LFNM*.
- [10] Scherger, B., Born, N., Jansen, C., Schumann, S., Koch, M., & Wiesauer, K. (2012). Compression Molded Terahertz Transmission Blaze-Grating. *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 2(5), 556-561. doi:10.1109/tthz.2012.2210892
- [11] Huang, Y., Ho, S., & Ma, J. (2009). WIDELY WAVELENGTH-TUNABLE & WAVELENGTH-SELECTABLE SEMICONDUCTOR LASERS BASED ON SUPER-COMPACT GRATING. *IEEE*.
- [12] Song, J., Fang, Q., Liow, T., Cai, H., Yu, M., Lo, G., & Kwong, D. (2011). CWDM Planar Concave Grating Multiplexer/Demultiplexer and Application in ROADM. *OSA*.
- [13] Rp-photonics.com,. (2015). *Where to buy diffraction gratings, suppliers, manufacturers and distributors - RP Photonics Buyer's Guide*. Revisado el 31 Julio 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/bg/buy\\_diffraction\\_gratings.html](http://www.rp-photonics.com/bg/buy_diffraction_gratings.html)
- [14] Alfano, R. (2006). *The supercontinuum laser source* (2nd ed., pp. preface, 1, 2, 33, 117, 251, 498-504). New York: Springer.
- [15] Agrawal, G. (2001). *Applications of nonlinear fiber optics* (2nd ed., pp. 414-416). San Diego: Academic Press.

- [16] Singh, S., & Singh, N. (2007). *NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS: ORIGIN, MANAGEMENT AND APPLICATIONS*. Progress In Electromagnetics Research, 73, 249-275. doi:10.2528/pier07040201
- [17] Paschotta, D. (2015). *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - self-phase modulation, SPM, Kerr effect, carrier density*. Rp-photonics.com. Revisado el 7 Agosto 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/self\\_phase\\_modulation.html](http://www.rp-photonics.com/self_phase_modulation.html)
- [18] Paschotta, D. (2015). *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - cross-phase modulation, XPM, Kerr effect*. Rp-photonics.com. Revisado el 7 Agosto 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/cross\\_phase\\_modulation.html](http://www.rp-photonics.com/cross_phase_modulation.html)
- [19] Osamu, A., Masateru, T., & Namiki, S. (2000). Four-Wave Mixing in Optical Fibers and Its Applications. *Furukawa Review*, (19).
- [20] Paschotta, D. (2015). *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - four-wave mixing, FWM, optical fiber, nonlinearity*. Rp-photonics.com. Revisado el 8 Agosto 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/four\\_wave\\_mixing.html](http://www.rp-photonics.com/four_wave_mixing.html)
- [21] Paschotta, D. (2015). *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - Raman scattering, Raman effect, gain, fibers, Stokes wave*. Rp-photonics.com. Revisado el 8 Agosto 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/raman\\_scattering.html](http://www.rp-photonics.com/raman_scattering.html)
- [22] Schneider, T. (2010). *Nonlinear optics in telecommunications* (3rd ed., pp. 1-3). Berlin: Springer.
- [23] Rp-photonics.com. (2015). *Where to buy supercontinuum sources and materials for supercontinuum generation, suppliers, manufacturers and distributors - RP Photonics Buyer's Guide*. Revisado el 3 Agosto 2015, disponible en: [http://www.rp-photonics.com/bg/buy\\_supercontinuum\\_generation.html](http://www.rp-photonics.com/bg/buy_supercontinuum_generation.html)
- [24] Machida, H., Nitta, J., Seko, A., & Kobayashi, H. (1984). High-efficiency fiber grating for producing multiple beams of uniform intensity. *Appl. Opt.*, 23(2), 330. doi:10.1364/ao.23.000330
- [25] Akedo, J., Machida, H., Kobayashi, H., Shirai, Y., & Ema, H. (1988). Point source diffraction and its use in an encoder. *Appl. Opt.*, 27(22), 4777. doi:10.1364/ao.27.004777
- [26] Paschotta, D. (2015). *Encyclopedia of Laser Physics and Technology - focal length, dioptric power, curved mirror, lens equation, microscope, photographic objective, focus, beam radius*. Rp-photonics.com. Revisado el 25 Agosto 2015, disponible en: [https://www.rp-photonics.com/focal\\_length.html](https://www.rp-photonics.com/focal_length.html)
- [27] Chen, P., Lin, H., Chen, C., Lee, C., & Lu, M. (2010). Color separation system with angularly positioned light source module for pixelized backlighting. *Opt. Express*, 18(2), 645. doi:10.1364/oe.18.000645.
- [28] Shokabo.co.jp, (2016). *lens and mirror*. [online] Disponible en: [https://www.shokabo.co.jp/sp\\_e/optical/labo/lens/lens.htm](https://www.shokabo.co.jp/sp_e/optical/labo/lens/lens.htm) [Revisado el 7 Agosto 2015].
- [29] Streibl, N., Nölscher, U., Jahns, J. and Walker, S. (1991). Array generation with lenslet arrays. *Appl. Opt.*, 30(19), p.2739.
- [30] Hamanaka, K., Nemoto, H., Oikawa, M., Okuda, E. and Kishimoto, T. (1990). Multiple imaging and multiple Fourier transformation using planar microlens arrays. *Appl. Opt.*, 29(28), p.4064.
- [31] Akiba, A. and Iga, K. (1990). Image multiplexer using a planar microlens array. *Appl. Opt.*, 29(28), p.4092.

- [32] Langois, P. and Beaulieu, R. (1990). Phase relief gratings with conic section profile used in the production of multiple beams. *Appl. Opt.*, 29(23), p.3434.
- [33] Granger, A., Song, L. and Lessard, R. (1993). Multiple beam generation using a stratified volume holographic grating. *Appl. Opt.*, 32(14), p.2534.
- [34] Bever, S. and Allebach, J. (1992). Multiple scattering by a planar array of parallel dielectric cylinders. *Appl. Opt.*, 31(18), p.3524.
- [35] Magnusson, R. and Shin, D. (1989). Diffraction by periodic arrays of dielectric cylinders. *Journal of the Optical Society of America A*, 6(3), p.412.
- [36] Ido, K., Kawamoto, C., Nakagama, H., Takahashi, H., Yanagisawa, H., Watanabe, H., Terada, T., Kitagawa, Y., Horiguchi, M. and Kimura, K. (1985). A Study On The Laparoscopic Measurement Of The Lesion On The Liver Surface By Means Of The Diffracted Laser Beam. *JJSLSM*, 5(3), pp.619-622.
- [37] Aoki, H. et. Al. (2012). Non-contact Respiration Measurement Using Structured Light 3-D Sensor. *SICE Annual Conference*.
- [38] Hirooki Aoki and Masato Nakajima, (2000) "Visual sensing system for detecting accidents in lavatories using fiber grating vision sensor", Proc. SPIE 4067, Visual Communications and Image Processing 2000, 1409 (May 30, 2000); doi:10.1117/12.386574;
- [39] Chang, W., Huang, C., Chen, C., Chang, C. and Yang, C. (2014). Design of a Novel Flexible Capacitive Sensing Mattress for Monitoring Sleeping Respiratory. *Sensors*, 14(11), pp.22021-22038.

# CAPÍTULO 3

## Teoría de rejillas de difracción y sus características

### 3.1 Introducción

En este capítulo se revisan los conceptos esenciales de la teoría, diseño, fabricación y caracterización de las rejillas de difracción, desde una revisión de los antecedentes físicos y matemáticos del fenómeno de difracción tales como la aproximación Fraunhofer hasta la teoría general para diseño y caracterización de rejillas de difracción, presentando definiciones y expresiones de sus parámetros.

### 3.2 Antecedentes del fenómeno de difracción

El primer trabajo acerca de la desviación de la luz de su propagación rectilínea fue publicado por Francesco Grimaldi, que lo denominó como *diffraçtio* [1]. Se consideró como una característica de los fenómenos ondulatorios de sonido, material o luz que ocurre cuando el frente de onda se encuentra obstruido de alguna manera.

Actualmente se utiliza el término difracción para hacer referencia a la desviación de la propagación rectilínea de los fenómenos ondulatorios cuando pasan a través de una abertura o cerca del borde de un obstáculo. El grado de difracción que se obtiene depende de la longitud de onda, la coherencia, la geometría de la abertura u obstáculo y del punto de observación. Los efectos de esta desviación son más pronunciados cuando la longitud de onda del fenómeno es comparable a las dimensiones del obstáculo o abertura.

Una de las teorías que abordan el fenómeno de difracción es la teoría escalar propuesta por el modelo de Kirchhoff. Ésta teoría describe la transferencia de energía radiante en términos de la amplitud escalar compleja de uno de los componentes vectoriales del campo electromagnético [2]. Sin embargo su análisis resulta muy complejo y se suele optar por aproximaciones más prácticas al fenómeno, como la de Fresnel conocida como de campo cercano y la de Fraunhofer o campo lejano, véase la Figura 3.5. Una de las diferencias entre las últimas dos aproximaciones reside en que el patrón de difracción de Fresnel cambia en forma y tamaño ante cualquier cambio en longitud de onda, forma y tamaño de la abertura y distancia de observación, mientras que en el modelo de Fraunhofer la forma de la abertura determina sólo la forma del patrón de difracción y los cambios en longitud de onda, tamaño de la abertura y distancia de observación cambian únicamente el tamaño del patrón.

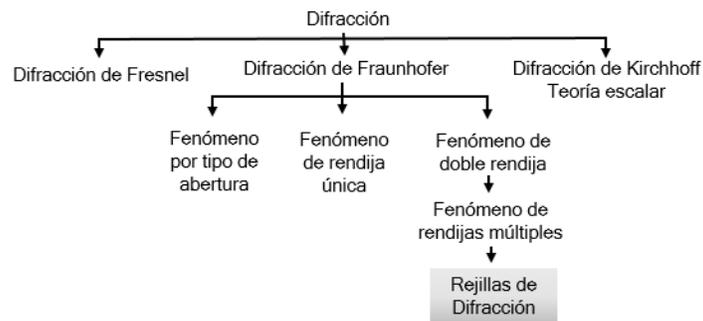


Figura 3.5 Esquema de los enfoques del fenómeno de difracción.

En el caso de la luz, se habla de la difracción de ondas electromagnéticas al pasar cerca o a través de un obstáculo transparente u opaco, cambiando la amplitud y/o la fase de una región del frente de onda. Los segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren unos con otros y producen una distribución de densidad de energía particular denominada figura de difracción [1]. Para analizar el caso específico de la luz en rejillas de difracción, se utiliza la aproximación de Fraunhofer.

### 3.2.1 Difracción de Fraunhofer

El principio de Huygens establece que cada punto en un frente de onda puede visualizarse como una fuente de trenes de onda esféricos secundarios, creando nuevos frentes de onda tangentes a las ondas esféricas secundarias que lo forman, como se ilustra en la Figura 3.6.

Sin embargo el principio de Huygens no puede por sí mismo explicar en su totalidad al fenómeno de difracción al sólo tomar en cuenta la parte común a la envolvente del frente de onda nuevo. Fue Fresnel que contribuyó al principio de Huygens agregando la idea de la interferencia en las ondas esféricas secundarias, tomando en cuenta también las fases que presentan. A esta nueva aportación se le denominó como principio de Huygens-Fresnel, estableciendo que cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo determinado, sirve como fuente de trenes de onda secundarios esféricos (de la misma frecuencia que la onda primaria). La amplitud del campo óptico en cualquier punto más allá es la superposición de todos estos trenes de onda (considerando sus amplitudes y fases relativas) [1].

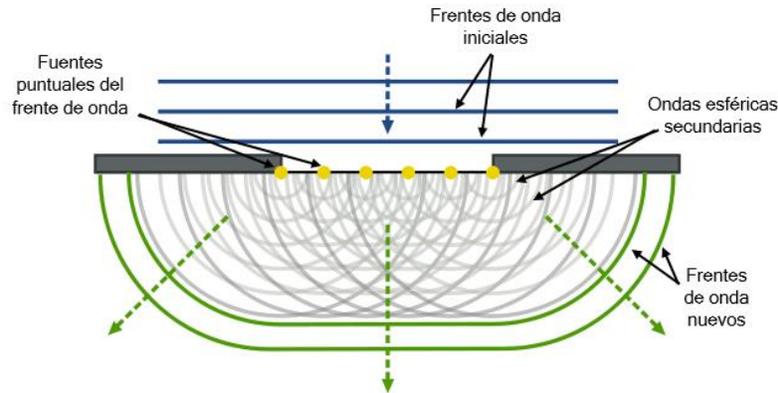


Figura 3.6 Difracción vista con el principio de Huygens.

La difracción Fraunhofer puede ser considerada como un caso particular de la difracción de Fresnel. Existe una transición de la difracción en campo cercano a la de campo lejano ilustrada en la Figura 3.7 en donde se observan los cambios que sufre la distribución de intensidad de difracción en diferentes planos, utilizando de referencia una distancia  $R$ . Para una abertura de longitud  $d$  y longitud de onda  $\lambda$ , la distancia  $R$  que divide los dos regímenes es conocida como distancia Rayleigh y es descrita como [3]:

$$R = \frac{d^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

En el plano  $P_1$  dentro de la distancia  $R$  se deben tomar consideraciones de la difracción de Fresnel, mientras que en el plano  $P_3$  más allá de la distancia  $R$ , la aproximación de Fraunhofer es aplicable. Sin embargo existe otro criterio más preciso para poder hacer una

distinción entre ambos modelos matemáticos utilizando como referencia al número de Fresnel ( $F$ ). Para considerar que la aproximación por el principio de Fraunhofer en ondas electromagnéticas es válido, se debe satisfacer la condición de este número adimensional expresado como:

$$F = \frac{d^2}{L\lambda} \quad (3.2)$$

En donde  $d$  es el tamaño (radio o ancho) de la apertura,  $L$  es la distancia de propagación de la onda de la apertura hasta un plano de observación y  $\lambda$  es la longitud de onda. Si  $F \ll 1$  entonces se considera válida la aproximación Fraunhofer, y si  $F \gg 1$  se considera a la difracción de Fresnel [4].

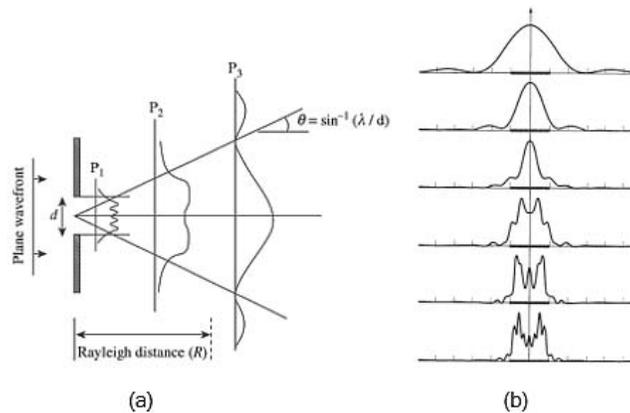


Figura 3.7 Trancisión de la difracción Fresnel a la Fraunhofer. (a) Distribuciones de intensidad en planos a distintas distancias [3]. (b) Sucesión de distribuciones de difracción a distancias crecientes desde Fresnel (abajo) a Fraunhofer (arriba) [1].

En la difracción Fraunhofer todos los haces que pasan a través de una apertura son aproximadamente paralelos. Una configuración práctica, por medio de un arreglo de lentes, de la difracción Fraunhofer se muestra en la Figura 3.8, en donde se tiene una pantalla opaca  $\Sigma$  con una apertura, un punto de observación  $P$  en un plano  $\sigma$ , la fuente puntual  $S$  de frentes de onda se ubica en el foco  $F_1$  del lente  $L_1$  y el plano de observación es el segundo plano focal del lente  $L_2$ . Por medio de este modelo, es posible tener claro que en la difracción Fraunhofer se produce un patrón determinado en materia de distribución de intensidad, que depende directamente de las condiciones del arreglo.

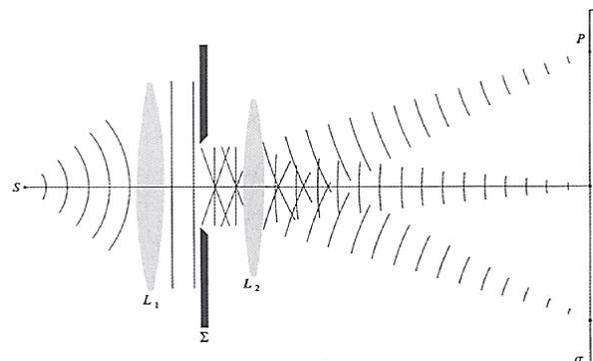


Figura 3.8 Difracción de Fraunhofer [1].

La distribución de intensidad del patrón producido por una abertura debido al principio de difracción Fraunhofer se grafica en la Figura 3.9 (b). Y puede ser deducido a partir del campo eléctrico total tomando en cuenta las contribuciones de cada punto. La irradiancia procedente de una fuente lineal coherente idealizada en la aproximación de Fraunhofer en función del ángulo  $\theta$ , tomando en cuenta el modelo ilustrado en la Figura 3.9 (a), es [1]:

$$I(\theta) = I(0) \left( \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2 \quad (3.3)$$

En donde  $I(0)$  es la densidad de flujo de cualquier fuente puntual que llegue al punto de observación P y  $\beta = \frac{kD}{2}$ , donde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Y teniendo que:

$$\text{sinc}\beta = \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \quad (3.4)$$

Entonces:

$$I(\theta) = I(0) \text{sinc}^2\beta \quad (3.5)$$

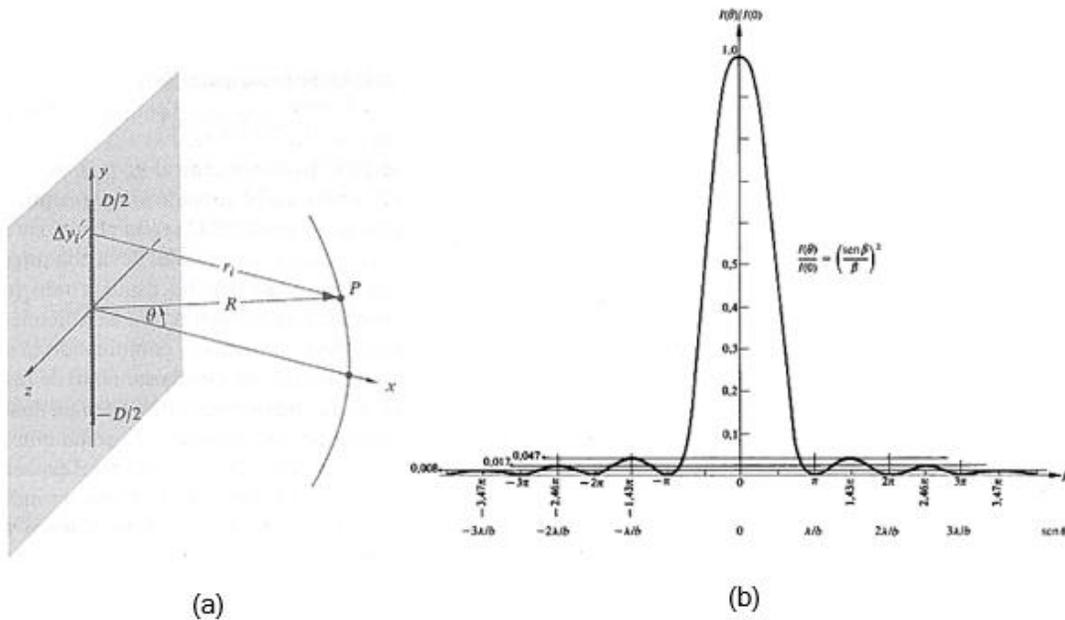


Figura 3.9 Distribución de difracción Fraunhofer de una sola abertura [1].

En el caso de la distribución de intensidad de difracción Fraunhofer producida por N aberturas con ancho b y distanciadas por a, como lo muestra el modelo de la Figura 3.10 (a), las contribuciones de cada rendija se superponen, la onda primaria excita las fuentes secundarias, los trenes de onda son coherentes entre sí y se ocasiona interferencia. La función de distribución de intensidad para este caso es [1]:

$$I(\theta) = I_0 \left( \frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right)^2 \left( \frac{\text{sen} N\alpha}{\text{sen} \alpha} \right)^2 \quad (3.6)$$

En donde  $I_0$  es la densidad de flujo en dirección a  $\theta=0$  emitida por cualquiera de las rendijas,  $I(0) = N^2 I_0$ ;  $\beta = \frac{k b}{2} \text{sen} \theta$ ;  $\alpha = \frac{k a}{2} \text{sen} \theta$  y N el número de aberturas. Teniendo máximos principales en:

$$a \text{sen} \theta_m = m \lambda \quad \text{Con } m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3.7)$$

La gráfica de la distribución Fraunhofer para un caso de 6 aberturas y  $a=4b$  se muestra en la figura 3.10 (b).

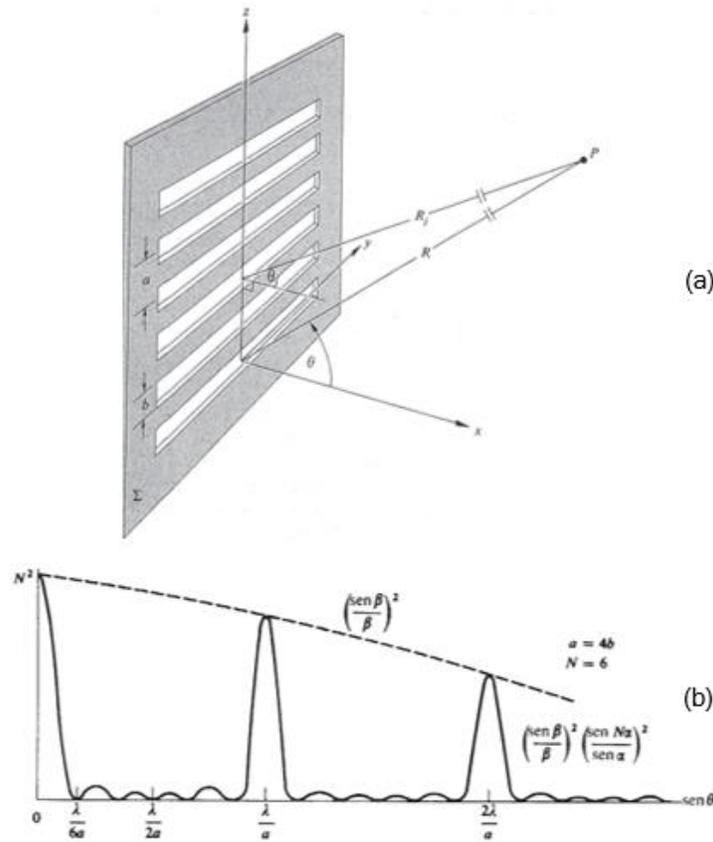


Figura 3.10 Distribución de difracción Fraunhofer producida por varias aberturas [1].

### 3.2.2 Difracción de Fraunhofer aplicada a rejillas de difracción

Desde el punto de vista de la difracción, cada surco de una rejilla puede considerarse como una fuente de luz difractada. Cada haz producido por los diferentes surcos se combina y forman un conjunto de frentes de onda difractados.

Cuando un haz de luz monocromático incide sobre una rejilla de difracción, este es difractado en diferentes direcciones discretas, cumpliendo la relación de máximos que presenta el modelo Fraunhofer. Por otro lado, cuando el haz de luz incidente es de luz blanca, este se difracta en sus diversos componentes monocromáticos con ángulos diferentes. Los comportamientos descritos se ilustran en la Figura 3.11. La separación de los distintos órdenes de difracción así como la intensidad de cada uno de ellos, depende de diversos factores de la rejilla, desde el tipo de sustrato con el que se realiza, la geometría que tenga, hasta la configuración en la que se use.

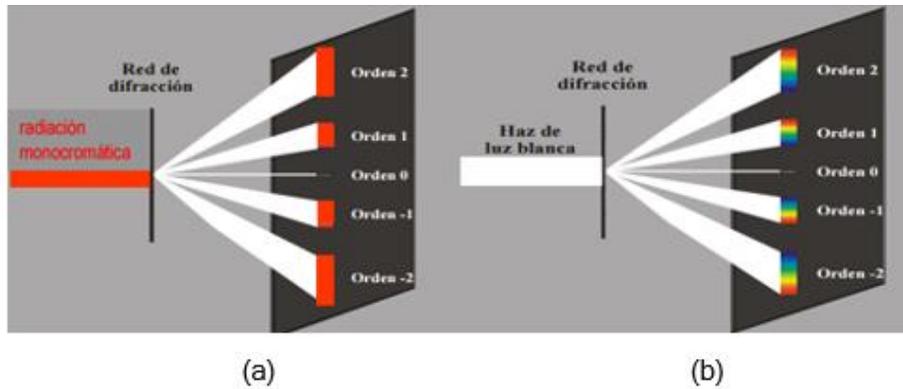


Figura 3.11 Difracción de: (a) luz monocromática y (b) luz blanca.

A continuación se presentan algunos conceptos teóricos de gran importancia en el campo de diseño y evaluación del comportamiento de las rejillas de difracción, los cuales se aplican tanto a nivel comercial como experimental, y por supuesto, también son aplicables en la presente investigación.

### 3.3 Ecuación de rejilla de difracción

En el modelo geométrico de una rejilla de difracción con espaciamento de longitud  $d$  que se muestra en la Figura 3.12, se tiene un rayo incidente de longitud de onda  $\lambda$  a un ángulo  $\alpha$ . Todos los ángulos son medidos respecto a la normal, la cual es una línea perpendicular al centro de la superficie de la rejilla.

Por convención, los ángulos medidos en dirección contraria a las manecillas del reloj a partir de la normal, son positivos [5]. Para la rejilla en reflexión de la Figura 3.12 (a) se tiene que  $\alpha > 0$ ,  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_0 < 0$  y  $\beta_{-1} < 0$ . En el diagrama (b) se tiene a una rejilla de transmisión en donde se aplica el mismo criterio.

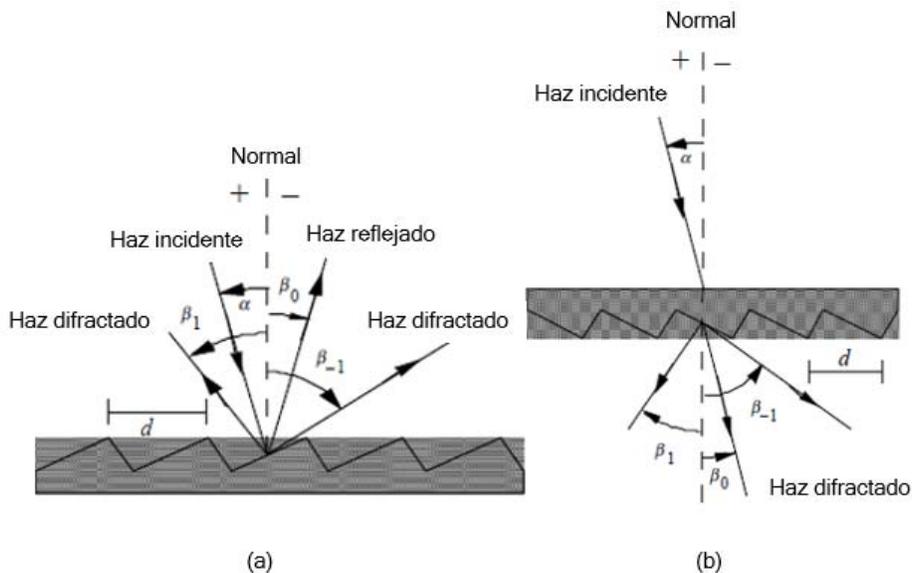


Figura 3.12 Rejilla de difracción (a) en reflexión y (b) en transmisión [5].

En la ilustración de la Figura 3.13 se ilustra el funcionamiento de una rejilla de difracción considerando frentes de onda con fases constantes. En este modelo dos rayos paralelos 1 y 2 inciden sobre la rejilla de espaciamiento  $d$  con la misma fase en el frente de onda A. El principio de interferencia constructiva implica que estos rayos están en fase también en el frente de onda difractado B si la diferencia entre sus recorridos,  $d\sin\alpha + d\sin\beta$ , es un número entero de longitudes de onda.

Esta relación está representada por la denominada ecuación de rejilla [5]:

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (3.8)$$

La cual rige las ubicaciones angulares de los principales máximos de intensidad cuando un haz de longitud de onda  $\lambda$  es difractado en una rejilla con espaciamiento  $d$ . El factor  $m$  es un entero comúnmente llamado orden de difracción u orden espectral.

En ocasiones es más conveniente utilizar la expresión:

$$Gm\lambda = \sin\alpha + \sin\beta; \quad G = \frac{1}{d} \quad (3.9)$$

Donde  $G$  es la frecuencia o densidad de surcos que usualmente se conoce como surcos o líneas por milímetro. Sin embargo esta ecuación es válida cuando el haz incidente y los difractados se encuentran en planos perpendiculares a los surcos en el centro de la rejilla. Esta clase de configuración se llama difracción clásica o difracción en plano.

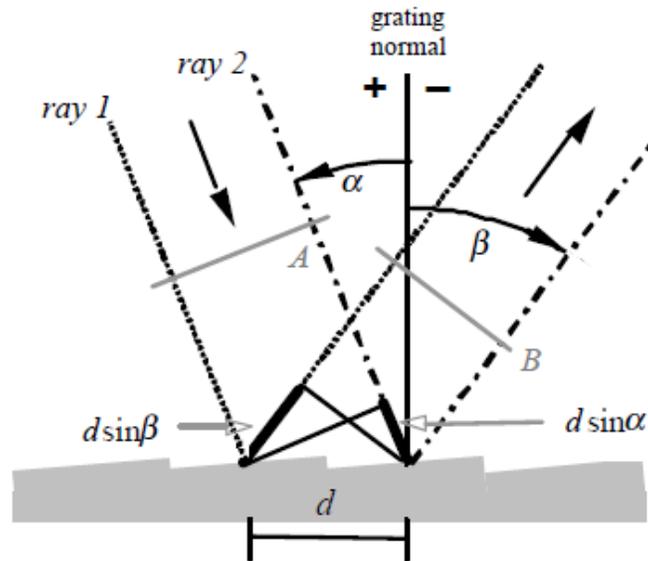


Figura 3.13 Esquema de la difracción en una rejilla para frentes de onda planos [5].

Si en cambio, el haz incidente no es perpendicular a los surcos, la ecuación de rejilla se convierte en [5]:

$$Gm\lambda = \cos\varepsilon(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (3.10)$$

Donde  $\varepsilon$  es el ángulo entre el haz incidente y el plano perpendicular a los surcos en el centro de la rejilla. Cuando  $\varepsilon \neq 0$  el espectro de difracción se encuentra en una forma cónica y no en un plano, llamando a estos casos, difracción cónica.

Si el haz incidente es perpendicular a la superficie de la rejilla de difracción, se habla entonces de la ecuación de rejilla para incidencia normal, la cual es una simple modificación a la expresión 3.8, haciendo  $\alpha=0$ :

$$m\lambda = d(\text{sen}\beta) \quad (3.11)$$

Existe además una expresión que relaciona la longitud de onda del rayo incidente y los ángulos de incidencia y difracción. En esta relación, dado un orden de difracción  $m$ , las diferentes longitudes de onda de frentes de onda policromáticos que inciden con un ángulo  $\alpha$ , están separados en ángulos determinados por [5]:

$$\beta(\lambda) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{m\lambda}{d} - \text{sen}\alpha\right) \quad (3.12)$$

Como se observa, hay un caso especial en donde  $m = 0$  y la rejilla actúa como un espejo ya que las longitudes de onda no se encuentran separadas, es decir:  $\beta = -\alpha$  para toda  $\lambda$ . Este caso se hace llamar reflexión especular o de orden cero.

Otro caso especial denominado configuración Littrow, se presenta cuando la luz es difractada en la misma dirección en que incide. Esto ocurre cuando  $\alpha = \beta$  y la ecuación de rejilla que le corresponde es [5]:

$$m\lambda = 2d \text{sen}\alpha \quad (3.13)$$

De acuerdo a la ecuación de rejilla de difracción, los órdenes sólo pueden existir bajo la restricción de  $\left|\frac{m\lambda}{d} < 2\right|$ , que asegura que el haz de longitud de onda  $\lambda$  sea difractado sólo en un número finito de órdenes positivos y negativos dentro del rango [5]:

$$-2d < m\lambda < 2d \quad (3.14)$$

Sin embargo, cuando se cumple que  $\frac{\lambda}{d} \ll 1$  el número de órdenes difractados es muy grande. En cuanto a la convención para designar signos a los órdenes ilustrada en la Figura 3.14, se presentan las siguientes recomendaciones [5]:

$$\begin{aligned} \beta > -\alpha &\rightarrow m > 0 \\ \beta < -\alpha &\rightarrow m < 0 \\ \beta = -\alpha &\rightarrow m = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

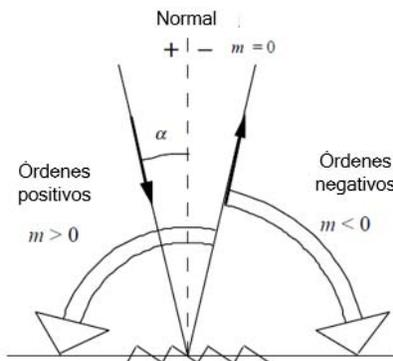


Figura 3.14 Convención de signos para órdenes de difracción [5].

### 3.4 Parámetros principales de las rejillas de difracción

A continuación se nombran los parámetros principales que poseen las rejillas de difracción, como la dispersión angular, resolución espectral, ancho de banda, rango espectral y eficiencia. Las expresiones que se presentan son válidas en los procesos de diseño y caracterización, se debe tener en cuenta que algunos de estos parámetros son normalmente dados a conocer al momento de la adquisición o evaluación de estos elementos difractivos.

#### 3.4.1 Dispersión angular

Una rejilla de difracción se encarga de dispersar la luz en el espacio por longitud de onda. La dispersión es la medida de separación angular o espacial entre las longitudes de onda de la luz difractada y se divide en dos categorías. La expresión del rango espectral por unidad angular es conocida como dispersión angular y el rango espectral por unidad de distancia es conocida como dispersión lineal.

La propagación angular  $\Delta\beta$  de un espectro de orden  $m$  entre las longitudes de onda  $\lambda$  y  $\lambda + \Delta\lambda$  puede obtenerse por medio de la diferencial de la ecuación de la rejilla de difracción, asumiendo un ángulo de incidencia  $\alpha$  constante. El cambio en el ángulo de difracción por unidad de longitud de onda ( $D$ ) o mejor conocido como dispersión angular queda expresado como [5]:

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} = \frac{m}{d} \sec \beta = Gm \sec \beta \quad (3.16)$$

En este caso la relación  $\frac{m}{d}$  no puede elegirse independientemente de otros parámetros, una vez que se haya determinado el ángulo de difracción  $\beta$ , se debe elegir una separación  $d$  pequeña para órdenes menores y separaciones  $d$  más grandes para órdenes más grandes. Si se substituye la ecuación de rejilla en la expresión 3.16, se encuentra al modelo general de dispersión dado por [5]:

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\lambda \cos \beta} \quad (3.17)$$

Para la configuración Littrow, la dispersión angular se expresa como [5]:

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \tan \beta \quad (3.18)$$

#### 3.4.2 Dispersión lineal

Para una longitud de onda  $\lambda$  difractada en el orden  $m$ , con un ángulo de difracción  $\beta$ , la dispersión lineal de la rejilla está expresada como el producto de la dispersión angular  $D$  y la distancia focal  $r'(\beta)$ , de manera que [5]:

$$r' D = r' \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{mr'}{d \cos \beta} = \frac{mr'}{d} \sec \beta = Gmr' \sec \beta \quad (3.19)$$

La cantidad  $r' \frac{d\beta}{d\lambda}$  es el cambio de posición a lo largo del espectro, una distancia real. Esta cantidad puede depender tanto del ángulo de difracción  $\beta$  como de la longitud de onda.

### 3.4.3 Resolución de la rejilla

La resolución es una característica de las rejillas de difracción y de los ángulos en los cuales trabaja. La resolución  $R$  de una rejilla es una medida de la habilidad para separar líneas espectrales adyacentes de longitud onda promedio  $\lambda$ . Está expresada como la cantidad adimensional [5]:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3.20)$$

Donde  $\Delta\lambda$  es el límite de resolución o la diferencia entre dos longitudes de onda de igual intensidad. Teóricamente se puede encontrar también a la potencia de resolución como:

$$R = |mN| \quad (3.21)$$

Donde  $m$  es el orden de difracción y  $N$  es la cantidad de surcos que son iluminados en la superficie de la rejilla. Se puede derivar otra expresión para la potencia de resolución a partir de la ecuación de la rejilla, dando como resultado [5]:

$$R = \frac{Nd(\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta)}{\lambda} \quad (3.22)$$

$Nd$  es igual al ancho efectivo  $W$  de la rejilla si el espaciamento  $d$  es uniforme y la rejilla es plana. Debido a que:

$$|\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta| < 2 \quad (3.23)$$

La resolución máxima viene dada por [5]:

$$R_{MAX} = \frac{2W}{\lambda} \quad (3.24)$$

### 3.4.4 Resolución espectral

La habilidad de una rejilla para proporcionar dos longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$  depende de las dimensiones y ubicación de las aberturas de entrada y salida, o en su caso de los elementos de detección. La resolución o límite de resolución espectral es la mínima diferencia  $\Delta\lambda$  entre dos longitudes de onda difractadas y es una cantidad con unidades espectrales, usualmente se describe en nanómetros.

### 3.4.5 Ancho de banda

El ancho de banda espectral  $B$  es un intervalo de longitudes de onda en donde la luz pasa a través de la abertura de salida o entra en un elemento de detección. Se define como la diferencia en longitud de onda entre los puntos de intensidad a la mitad del máximo a cada lado de un máximo de intensidad. Se puede estimar por medio del producto del ancho de la abertura de salida  $w'$  y el recíproco de la dispersión lineal  $P$  [5]:

$$B \approx w'P \quad (3.25)$$

En donde  $P$  es una medida del cambio en longitud de onda (nm) respecto al cambio en la ubicación a lo largo del espectro (mm) y es el recíproco a la dispersión lineal:

$$P = \frac{d \cos \beta}{m r'} \quad (3.26)$$

En ocasiones los términos resolución y potencia de resolución se usan indistintamente, ambos son aplicables en rejillas clásicas con frentes de onda planos o luz colimada. Para otro tipo de rejillas, como las cóncavas o con patrones de espaciamentos distintos, las ecuaciones descritas pueden ser aproximaciones útiles aunque no tan precisas.

### 3.4.6 Magnificación Anamórfica

La magnificación anamórfica es una relación  $\frac{b}{a}$  para una longitud de onda  $\lambda$ , que describe la relación entre el ancho de un haz difractado colimado y el ancho del haz incidente. Véase la Figura 3.15. La magnificación sólo varía dependiendo la longitud de onda y viene dada por [5]:

$$\frac{b}{a} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (3.27)$$

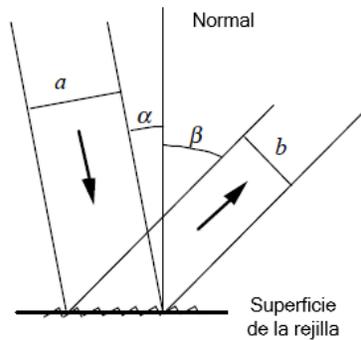


Figura 3.15 Esquema de magnificación anamórfica [5].

### 3.4.7 Resolución libre espectral

Es posible, dada la ecuación de la rejilla de difracción, que exista un traslape de los órdenes. Por ejemplo, un haz de longitud de onda  $\lambda$  difractado en el orden  $m=1$ , coincide con el haz de longitud de onda  $\frac{\lambda}{2}$  difractado en el orden  $m=2$ , etc. El rango de longitudes de onda en un determinado orden espectral, en el cual la superposición de luz de órdenes adyacentes no ocurre es llamado resolución libre espectral  $F_\lambda$ . La definición formal de este rango establece que en un orden  $m$ , la longitud de onda de la luz que se difracta en la dirección de  $\lambda$  en el orden  $m+1$  es  $\lambda + \Delta\lambda$ , [5]:

$$\lambda + \Delta\lambda = \frac{m+1}{m} \lambda \quad (3.28)$$

En donde:

$$F_\lambda = \Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} \quad (3.29)$$

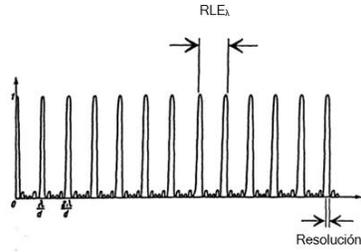


Figura 3.16 Función de interferencia normalizada [6].

### 3.4.8 Eficiencia de la rejilla

La eficiencia de una rejilla de difracción está definida como la potencia o intensidad de la luz monocromática difractada en el orden al que se realizan las mediciones, entre la potencia de la luz incidente (eficiencia relativa) o entre la potencia en reflexión especular producida por un sustrato cubierto con el mismo material y configuración de la rejilla (eficiencia relativa). La distribución de energía en las longitudes de onda difractadas por una rejilla en sus diferentes órdenes espectrales, depende de parámetros como la potencia y polarización del haz incidente, los ángulos de incidencia y difracción, el índice de refracción variable de los materiales de la superficie de la rejilla y del espaciamiento entre surcos. Sin embargo, existe una aproximación ampliamente utilizada para calcular la eficiencia de una rejilla de difracción reflejante, llamada la condición de resplandor o “blaze condition”:

$$m\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta_B \quad (3.30)$$

Donde  $\theta_B$  es el ángulo de resplandor o “blaze angle” de la rejilla, un ángulo entre la superficie o faceta del surco y el plano de la rejilla. Véase la Figura 3.17. Cuando se satisface esta condición se tiene que:

$$\alpha - \theta_B = \beta - \theta_B \quad (3.31)$$

La ecuación 2.30 lleva a la máxima eficiencia cuando se cumple también que:

$$2K = \alpha - \beta = 0 \quad (3.32)$$

En donde  $2K$  es el ángulo entre el haz incidente y el difractado, dando como resultado la condición de resplandor Littrow. Cuando la condición de la ecuación 3.30 no se cumple, la eficiencia disminuye al moverse de la configuración Littrow, como se ve en la Figura 3.18.

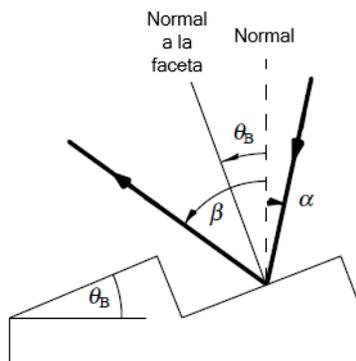


Figura 3.17 Geometría de la condición de resplandor o blaze condition [5].

Para un determinado ángulo  $\theta_B$  la condición Littrow asegura una longitud de onda de resplandor  $\lambda_B$  en la cual la eficiencia de la rejilla es máxima [5]:

$$\lambda_B = \frac{2d}{m} \text{sen } \theta_B \quad (3.33)$$

Ciertos catálogos de rejillas dan a conocer la longitud de onda de resplandor Littrow en primer orden:

$$\lambda_B = 2d \text{sen} \theta_B; \quad m = 1 \quad (3.34)$$

Y a menos que se indique lo contrario, la eficiencia de una rejilla de difracción es medida en configuración Littrow a ciertas longitudes de onda.

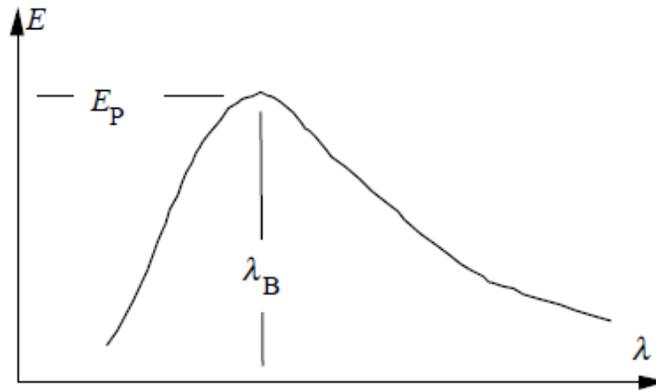


Figura 3.18 Curva típica de eficiencia. Eficiencia en un modo vs longitud de onda [5].

Para otro tipo de rejillas de difracción con patrones senoidales, que son muy frecuentes entre las rejillas holográficas, o patrones rectangulares [7], también llamados laminares, como los que se muestran en la Figura 3.19, es usual que la longitud de onda de resplandor se calcule con las siguientes aproximaciones:

$$\lambda_B = 3.4h \rightarrow \text{Patrones senoidales}$$

$$\lambda_B = 4h \rightarrow \text{Patrones rectangulares}$$

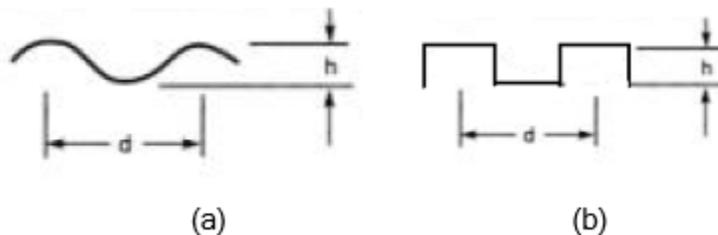


Figura 3.19 Rejilla de difracción con (a) patrón senoidal y (b) patrón rectangular.

### 3.5 Conclusiones

En este capítulo se expusieron los conceptos y expresiones matemáticas del fenómeno de difracción, incluyendo ecuaciones generales para diseño y caracterización de rejillas comunes, proporcionando expresiones para definir características como: densidad de surcos, ángulos de incidencia, ángulos de difracción y parámetros como: órdenes de difracción, separación angular, dispersión angular, dispersión lineal, factor  $P$ , resolución, magnificación anamórfica, resolución libre espectral y eficiencia. La teoría matemática proporcionada en este capítulo se retoma en el siguiente, aplicando las expresiones pertinentes en el diseño y caracterización de las rejillas de difracción experimentales a evaluar, puesto que las expresiones generales para rejillas de difracción son aplicables en las rejillas de fibra óptica que se proponen en esta investigación.

### 3.6 Referencias del capítulo 3

- [1] Hecht, E. (2000). *Óptica* (3rd ed., pp. 152, 441-515). Madrid: Addison-Wesley Iberoamericana.
- [2] Driggers, R. (2003). *Encyclopedia of optical engineering* (pp. 2294-2295). New York: Marcel Dekker.
- [3] Graham-Smith, F., & King, T. (2007). *Optics and photonics* (2nd ed., pp. 240-241). Chichester: John Wiley & Sons.
- [4] Kirkby, L. (2011). *Physics* (pp. 224, 229-232). UK: Royal College of General Practitioners.
- [5] Palmer, C., & Loewen, E. (2004). *Diffraction grating handbook* (6th ed., pp. 20-42). Rochester, NY: Richardson Grating Laboratory.
- [6] Loewen, E., & Popov, E. (1997). *Diffraction gratings and applications* (p. 32). New York: M. Dekker.
- [7] Zeiss.com,. (2015). *Mechanically ruled gratings and holographical corrected gratings from Carl Zeiss | ZEISS United States*. Revisado el 9 Septiembre 2015, disponible en: [http://www.zeiss.com/microscopy/en\\_us/website/oss/fundamentals-gratings.html](http://www.zeiss.com/microscopy/en_us/website/oss/fundamentals-gratings.html)

## CAPÍTULO 4

### Diseño y fabricación de rejillas de difracción basadas en arreglos de fibra óptica

#### 4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño de rejillas de difracción experimentales hechas con arreglos de fibra óptica. Existen diversos tipos de fibra óptica para un gran número de aplicaciones, entre las que se pueden mencionar se encuentran las fibras multimodo, monomodo, ultra delgadas de borosilicato o BK7, fibras plásticas, microestructuradas, fibras holey, entre otras. Cada una de ellas está hecha con distintas clases de materiales y pueden tener estructuras interiores geoméricamente diferentes.

Dentro de los catálogos de fibra óptica se pueden encontrar características que varían dependiendo del tipo de fibra, como por ejemplo el índice de refracción, dimensiones, apertura numérica, etc. Al variar las características de cada fibra, los efectos que éstas producen al interactuar con un haz de luz pueden cambiar radicalmente. Es por esto que la realización de pruebas con diversos tipos de fibra resulta enriquecedor para la investigación que se presenta.

En la primer parte de este capítulo se describen las fibras ópticas utilizadas y el procedimiento utilizado para la fabricación de las muestras experimentales. También se realizan los cálculos de diseño y se muestran los parámetros teóricos que poseen las rejillas experimentales para su utilización con fuentes láser monocromáticas. Finalmente se agregan los valores de diseño teórico de rejillas dentro del rango de emisión de supercontinuo y dado que este estudio se delimita al rango del espectro visible en la parte experimental, se realizan y se muestran los cálculos pertinentes para este rango espectral al final del capítulo.

#### 4.2 Rejillas experimentales de fibra óptica

En esta sección se describe la construcción de rejillas de difracción especiales, las cuales trabajan en modo de transmisión, hechas a partir de arreglos de fibra óptica. A continuación se detalla el proceso de diseño y fabricación de las mismas.

##### 4.2.1 Fabricación de arreglos de fibra óptica

Existen diversos tipos de fibra óptica, los cuales poseen características especiales. Algunos de los parámetros que pueden cambiar según la clasificación de las fibras son: el índice de refracción, las dimensiones físicas, el tipo de material, los efectos no lineales, la dispersión, etc. Para la fabricación de muestras experimentales de rejillas de difracción hechas a base de arreglos de fibra óptica se propone la utilización de cinco tipos diferentes de fibra, mostrados en la Tabla 4.1 en donde  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra,  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento si es que lo tiene y  $d$  es el diámetro total de la fibra. En el presente estudio se tomaron en cuenta a las fibras de sílice monomodo (SMF) y multimodo (MMF) ya que son comunes en el área de comunicaciones ópticas. Estos tipos de fibra pueden ser optimizados para trabajar en distintos rangos espectrales según la aplicación en donde se utilicen, abarcando desde el visible hasta el infrarrojo cercano. Están

compuestas en su forma más básica por un núcleo de sílice y una capa que lo cubre, llamada revestimiento hecho generalmente de sílice fluorado. Después se agregan más capas plásticas para proteger la estructura interna por donde se transmite el haz de luz. Un ejemplo ilustrativo de la estructura interna de las fibras monomodo y multimodo se muestra en la Figura 4.1.

Existen fibras ópticas de diversos diámetros, en comunicaciones es típico que las fibras monomodo de sílice el diámetro del núcleo sea de 9  $\mu\text{m}$ , y en las fibras multimodo llegue a ser de 50  $\mu\text{m}$  o 62.5  $\mu\text{m}$ . El diámetro total, incluyendo al revestimiento, para ambos tipos de fibra es comúnmente de 125  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 4.1 Fibras ópticas utilizadas en las muestras.**

Muestra	Tipo de F.O.	$n_1$	$n_2$	$d[\mu\text{m}]$	Material	Proveedor
1	POF	1.49	1.41	1000	PMMA	Jiangxi Daishing
2	POF	1.49	1.41	250	PMMA	Jiangxi Daishing
3	MMF	1.46	1.45	125	Sílice	Thorlabs
4	SMF	1.49	1.48	125	Sílice	Thorlabs
5	Microhilos	1.51	-	50	BK7	-

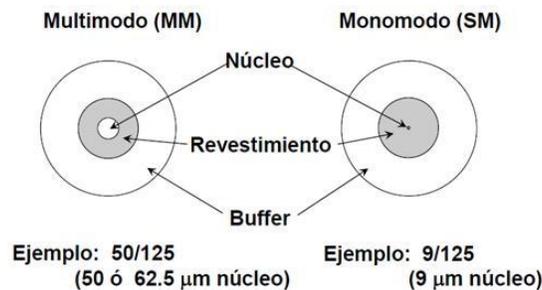


Figura 4.1 Estructura interna de las fibras ópticas monomodo y multimodo [1].

Por otra parte, las fibras ultra delgadas de BK7 tienen una mayor presencia en espectrómetros. Estas fibras ultradelgadas son también conocidas como microhilos y trabajan aceptablemente en el rango de longitudes de onda de 400 a 1600 nm, especialmente en el rango visible. Su geometría interna consiste de un núcleo hecho de BK7, un material muy utilizado en el área óptica para la fabricación de lentes de precisión. El diámetro de las fibras de BK7 es usualmente de 50  $\mu\text{m}$ , pero en el mercado pueden encontrarse más delgadas. No es común que cuenten con revestimiento, aunque en ocasiones pueden llegar a tener capas protectoras plásticas sobre el núcleo.

Las fibras plásticas, por otro lado, son económicas y fácilmente manipulables, siendo soluciones efectivas incluso para comunicaciones ópticas en distancias cortas. Estas fibras plásticas pueden trabajar en rangos de longitud de onda entre 400 y 1100 nm [3]. Las fibras plásticas, POF por sus siglas en inglés, cuentan con un núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA) y un revestimiento de PMMA fluorinado, los diámetros pueden encontrarse en el orden de los micrómetros o milímetros. En la Figura 4.2 se puede observar un ejemplo de fibra óptica plástica junto a su gráfico de atenuación en el rango visible.

Las fibras ópticas de sílice, BK7 y plásticas pueden funcionar aceptablemente en distintos rangos espectrales, los cuales a pesar de ser amplios, no llegan a contemplar en su totalidad al rango que pueden llegar a emitir los sistemas de supercontinuo (espectro visible e infrarrojo cercano). Sin embargo este tipo de fibras resultan viables para propósitos de esta investigación, la cual se delimita en la parte experimental al estudio del comportamiento de las rejillas especiales en el espectro visible.

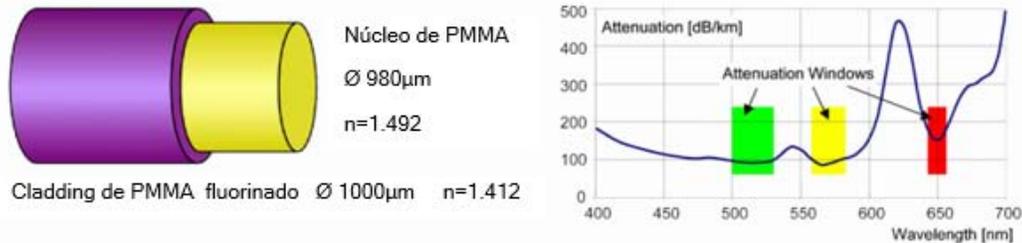


Figura 4.2 Geometría interna de una fibra óptica plástica y su respectivo gráfico de atenuación en el rango visible [2].

#### 4.2.1.1 Preparación de fibras ópticas

El esquema general para la fabricación de muestras de rejillas de difracción hechas con arreglos de fibra óptica en esta tesis, se muestra en la Figura 4.3. El área útil de la muestra, es decir, el área en donde se hace incidir un haz de luz, es la parte central de la misma, en donde se encuentran las fibras alineadas adyacentemente unas de otras.

La primera etapa para la realización de las rejillas de difracción es el proceso de corte y preparación de las fibras. Este proceso incluye el corte de la fibra, la separación de las capas de protección plásticas, conservando sólo el núcleo y el revestimiento, si lo tienen, y finalmente la limpieza de cada una de las fibras para retirar los residuos del procedimiento. En el caso de las fibras ópticas plásticas, se cortan tramos de aproximadamente 5 cm y se les retira la protección plástica exterior con pinzas stripper.

Después se limpian con una solución con alcohol. A las fibras de sílice multimodo y monomodo se les retira todos los recubrimientos hasta el revestimiento, utilizando pinzas para las capas más externas y un stripper térmico para retirar la última capa plástica denominada como buffer. Después se cortan en tramos de aproximadamente 2 cm y se limpian con una solución con alcohol. Las fibras ultra delgadas de BK7 siguen el mismo proceso que las fibras de sílice, pero tienen la peculiaridad de carecer de revestimiento, entonces se les retira la capa plástica que las recubre hasta tener sólo el núcleo.

#### 4.2.1.2 Realización de la base del arreglo y alineamiento de las fibras

Una vez que las fibras han sido preparadas, se tensan manualmente y se colocan sobre una base plana de vidrio. La base de vidrio sobre la que se colocan las fibras, se realiza adhiriendo 4 portaobjetos para microscopio con pegamento instantáneo, se coloca cinta para reforzar las partes centrales de los portaobjetos y así evitar que se rompan al manejarlos. Al colocar las fibras sobre la base, manteniendo la tensión aplicada, se procede a su alineamiento. Para alinear las fibras basta con ejercer presión sobre las fibras hacia la

base de vidrio hasta que todas las fibras se encuentren adyacentes unas de otras. Se utilizan guantes de látex en el proceso de tensado, evitando ensuciar la superficie de las fibras y para poder alinearlas se hace uso de un microscopio, ya que a medida que el diámetro de las fibras disminuye, la manipulación de las mismas a simple vista se vuelve más complejo.

### 4.2.1.3 Unión del arreglo

En la realización de las muestras, se propuso para esta tesis el uso de pegamento líquido instantáneo para mantener a las fibras ópticas en sus posiciones sobre la base de vidrio transparente. Esto se consigue colocando una gota de pegamento en los extremos de las fibras una vez que se encuentran alineadas sobre la base. Se debe esperar al menos 10 segundos hasta que el pegamento haga efecto, ejerciendo una sutil presión sólo si las fibras se comienzan a separar. Es de particular importancia que el pegamento se mantenga en los extremos de las fibras, ya que de otra manera, al ser líquido, puede desplazarse a lo largo del arreglo y la muestra no tendría los resultados esperados.

Se pueden manejar varias fibras al mismo tiempo, dependiendo del tamaño de las mismas y en este caso se tomaron 8 tramos de fibras preparadas en promedio para cada una de las muestras. Posteriormente se puede seguir el mismo procedimiento que aquí se describe para seguir agregando más fibras adyacentes a la muestra.

Cada uno de los procesos para la realización del arreglo de fibras se realiza de forma manual, por lo que se debe tener especial cuidado en su manejo, para evitar que la muestra se rompa o ensucie. Al final, cuando las fibras están adheridas a la base, se puede limpiar al conjunto entero de fibras con una solución con alcohol para retirar los residuos que se produzcan durante toda la fabricación. En la Figura 4.4 se puede observar el resultado final de las muestras que se obtuvieron con el procedimiento anteriormente descrito, realizadas con fibra óptica plástica, fibra multimodo o monomodo de sílice o fibra ultradelgada de BK7.

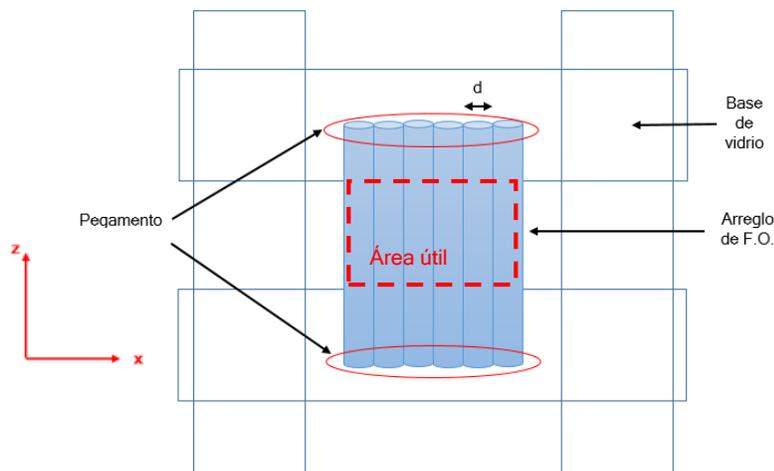
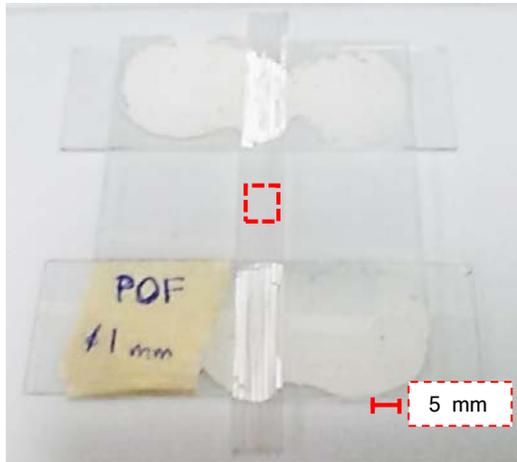
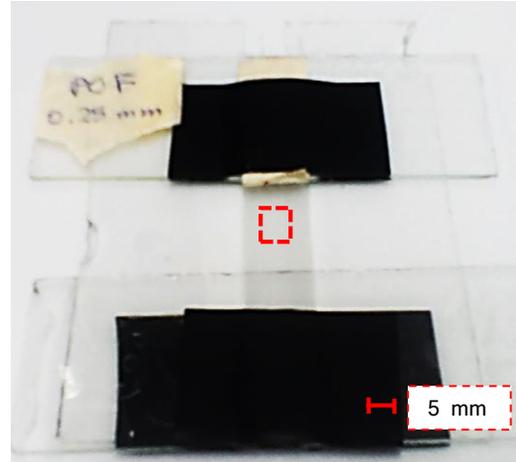


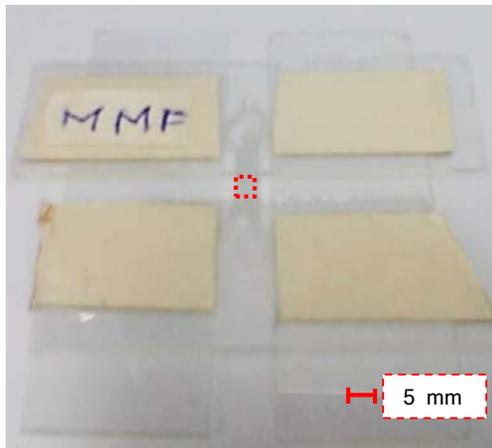
Figura 4.3 Esquema de las rejillas de difracción experimentales a base de fibra óptica.



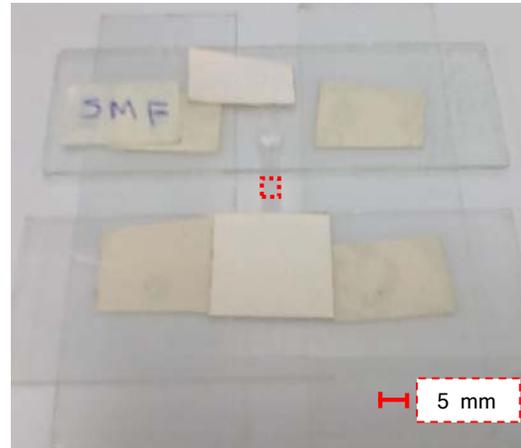
(a)



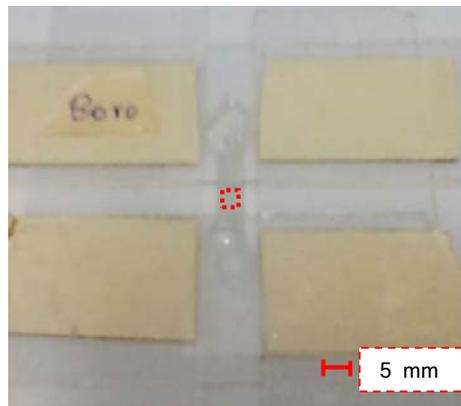
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.4 Rejillas hechas de: (a) POF de  $\text{Ø}1$  mm, (b) POF de  $\text{Ø}0.25$  mm, (c) MMF, (d) SMF y (e) Microhilos de BK7. El recuadro punteado rojo indica el área útil de cada rejilla.

## 4.2.2 Determinación del error por alineamiento

Se utilizó un programa especial para manipulación y procesamiento de imágenes de muestras experimentales tomadas con microscopio, llamado ImageJ [4], un programa libre multiplataforma, para tener una estimación del error porcentual del alineamiento de las fibras respecto al diámetro de cada una de ellas. Este software puede hacer mediciones precisas de los objetos en una imagen utilizando escalas, las cuales contemplan una cantidad de referencia determinada en pixeles y las convierte en unidades de longitud. La magnitud de referencia debe ser proporcionada por el usuario a partir de otra imagen cuyas dimensiones se conozcan. En este estudio se usó como referencia una regla graduada con resolución de 397 nm.

El error por alineamiento se debe al espacio entre fibras adyacentes, resultante del proceso de fijación de las fibras a la base de vidrio, como se puede observar en la Figura 4.5 (b) en donde las fibras quedan separadas unas de otras por una distancia determinada (ver recuadro punteado). Por ejemplo, para la muestra uno se tiene una distancia promedio de error por alineamiento entre fibras ( $d_{error}$ ) de 0.015 mm y el error porcentual quedaría como:

$$Error\ por\ alineamiento\ [\%] = \frac{d_{error} \times 100}{d} = \frac{(0.015)(100)}{1} = 1.5\ \% \quad (4.1)$$

En la Tabla 4.2 se muestran los valores de error porcentual promedio de alineamiento de las fibras. Observando los valores de la Tabla 4.2 se nota que el error por alineamiento incrementa al utilizar fibras ópticas más delgadas, ya que la referencia son sus diámetros totales y la manipulación de las mismas se dificulta más al disminuir su tamaño.

Tabla 4.2 Error por alineamiento de los arreglos de fibra óptica.

Muestra	Tipo de F.O.	$d$ [mm]	$d_{error}$ [mm]	Error por alineamiento [%]
1	POF	1	0.015	1.5
2	POF	0.25	0.035	14
3	MMF	0.125	0.0175	14
4	SMF	0.125	0.015	12
5	Microhilos	0.050	0.01	20

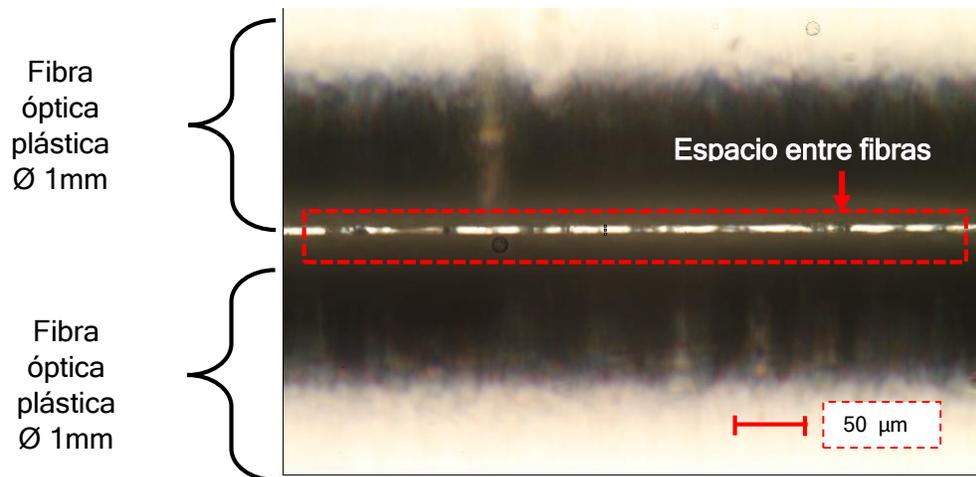


Figura 4.5 Micrografía de la muestra 1.

### 4.2.3 Parámetros principales de las rejillas de difracción de fibra óptica

La **densidad de surcos** denominado factor  $G$  de cada muestra, está dado por la expresión:

$$G = \frac{1}{d \text{ [mm]}} \left[ \frac{\text{líneas}}{\text{mm}} \right] \quad (4.2)$$

La expresión involucra el **espaciamiento entre líneas**  $d$ . En este caso,  $d$  se toma como el diámetro de la fibra óptica y por ejemplo, para la muestra 1 se tiene  $d$  igual a 1 mm:

$$G = \frac{1}{1 \text{ [mm]}} = 1 \left[ \frac{\text{líneas}}{\text{mm}} \right] \quad (4.3)$$

Por otro lado, se denomina como  $A$ , al **área de difracción efectiva** de las muestras o área útil, que es la zona que se encuentra en el centro de la rejilla experimental, de tal manera que el paso de la luz no se vea afectado por la base de vidrio. La **distancia focal**  $F$  que presentan las fibras cuando son modeladas como lentes cilíndricos está determinada por la expresión:

$$F = \left( (n - 1) \left( \frac{2}{R} \right) \right)^{-1} \quad (4.4)$$

En donde  $n$  es el índice de refracción del material de la fibra y  $R$  es su radio. Haciendo una aproximación para la muestra 1, tomando  $n$  como el índice de refracción de su núcleo, se tiene:

$$F = \left( (1.49 - 1) \left( \frac{2}{500 \mu\text{m}} \right) \right)^{-1} = 510 \mu\text{m} \quad (4.5)$$

En la Tabla 4.3 se resumen los parámetros de densidad de surcos  $G$ , espaciamento  $d$ , área de difracción efectiva  $A$  y distancia focal  $F$  de las muestras experimentales de fibra óptica realizadas en laboratorio. Se incluyen además las micrografías de los arreglos de fibras ópticas. Como se puede observar las rejillas experimentales de fibra óptica elaboradas tienen una densidad de surcos  $G$  pequeña, comparada a la densidad de surcos que tienen algunas rejillas de difracción comerciales las cuales tienen usualmente más de 40 líneas por milímetro.

Tabla 4.3 Parámetros de las muestras hechas a base de F.O.

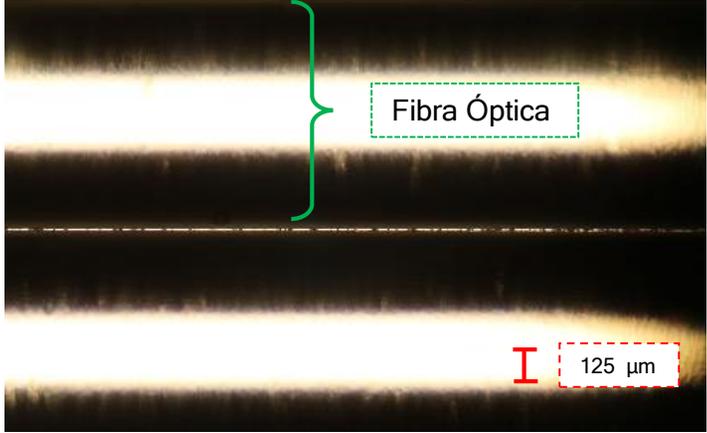
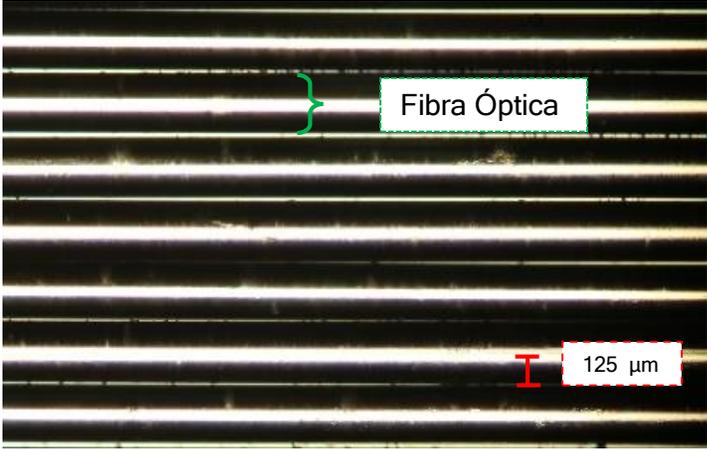
Muestra	Tipo de F.O.	$d[\mu\text{m}]$	$G$ [ $\frac{\text{Lineas}}{\text{mm}}$ ]	$F[\mu\text{m}]$	$A$ [mm x mm]	Micrografía
1	POF	1000	1	510	5 x 5	
2	POF	250	4	128	5 x 5	

Tabla 4.3 Parámetros de las muestras hechas a base de F.O. (continuación)

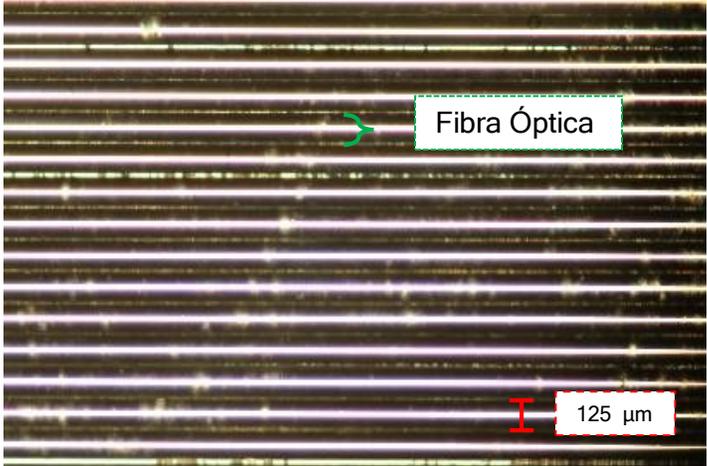
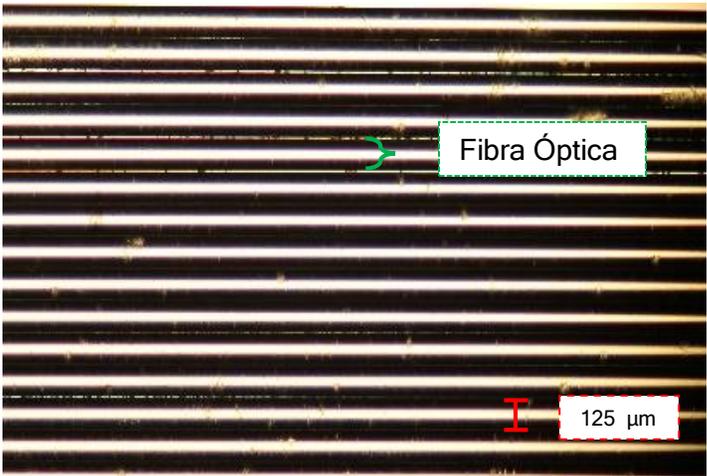
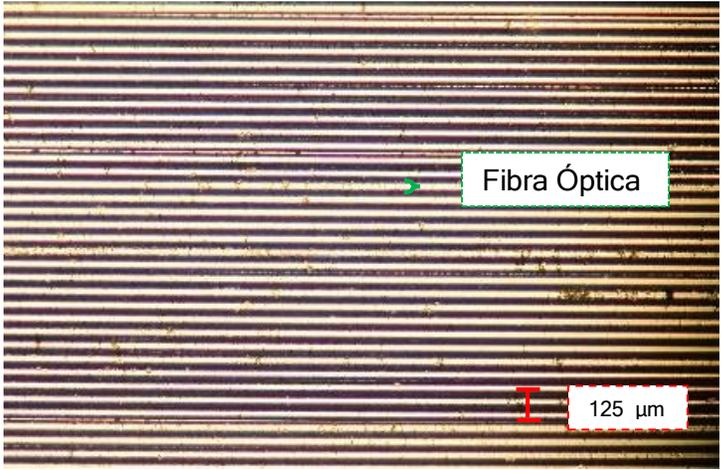
Muestra	Tipo de F.O.	d [ $\mu\text{m}$ ]	G [ $\frac{\text{Líneas}}{\text{mm}}$ ]	F [ $\mu\text{m}$ ]	A [mm x mm]	Micrografía
3	MMF	125	8	68	3 x 3	
4	SMF	125	8	64	3 x 3	

Tabla 4.3 Parámetros de las muestras hechas a base de F.O. (continuación)

Muestra	Tipo de F.O.	d [ $\mu\text{m}$ ]	G [ $\frac{\text{Lineas}}{\text{mm}}$ ]	F [ $\mu\text{m}$ ]	A [mm x mm]	Micrografía
5	Microhilos	50	20	24	1 x 1	

Las rejillas de difracción poseen parámetros de gran importancia para poder conocer su comportamiento bajo ciertas condiciones. Para facilitar la explicación se presenta a continuación la obtención de parámetros de la muestra 1, sin embargo, este procedimiento se realizó para todas las muestras y los resultados se proporcionan en la sección 4.2.4.

Uno de los principales parámetros de las rejillas es el **rango de órdenes** que se obtiene a partir de la geometría de la rejilla, descrito como:

$$\frac{-2d}{\lambda} < m < \frac{2d}{\lambda} \quad (4.6)$$

Tomando como ejemplo a la muestra 1, para una longitud de onda  $\lambda=633 \text{ nm}$ , se tendría:

$$\frac{-2(1000\mu\text{m})}{(633 \text{ nm})} < m < \frac{2(1000\mu\text{m})}{(633 \text{ nm})} \quad (4.7)$$

$$-3160 < m < 3160 \quad (4.8)$$

Considerando el esquema de difracción de la Figura 4.6, se pueden calcular algunos otros parámetros de las rejillas, comenzando por la separación entre ángulos de los rayos difractados. Esta **separación angular** ' $\beta$ ' se puede calcular con la expresión:

$$\beta(\lambda) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{m\lambda}{d}\right) \quad (4.9)$$

En la muestra 1, para el orden  $m=1$ , se obtiene:

$$\beta(\lambda = 633 \text{ nm}) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{633 \text{ nm}}{1 \text{ mm}}\right) = 0.0363^\circ \quad (4.10)$$

La separación angular  $\beta$  entre órdenes de difracción que presentan las rejillas comerciales más comunes se encuentran típicamente entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , siendo más usual las separaciones mayores a  $20^\circ$  y menores a  $70^\circ$ .

La **dispersión angular** ' $D$ ' se calcula como:

$$D = \frac{\tan \beta}{\lambda} \left[ \frac{\mu\text{rad}}{\text{nm}} \right] \quad (4.11)$$

Para la muestra 1, en el ángulo del haz difractado obtenido anteriormente se obtiene:

$$D = \frac{\tan(0.0363)}{633} = 1 \left[ \frac{\mu\text{rad}}{\text{nm}} \right] \quad (4.12)$$

En las rejillas de difracción comerciales, comúnmente se desean valores altos de dispersión angular.

Por otro lado, la **dispersión lineal** se expresa de la siguiente manera:

$$r'D = \frac{L}{\cos \beta} D \left[ \frac{\text{mm}}{\text{nm}} \right] \quad (4.13)$$

La variable  $L$  representa la distancia entre la rejilla de difracción y un plano de observación paralelo frente a ella. Para la experimentación con fuentes monocromáticas se toma el valor de  $L=200 \text{ [mm]}$ , mientras que para la experimentación con la fuente de amplio espectro se usa  $L=1000 \text{ [mm]}$ , ya que en las pruebas preliminares se observó que al utilizar la fuente de supercontinuo, la separación entre órdenes de difracción se puede apreciar mejor en el

plano de observación cuando este se coloca a una distancia mayor. En el caso de la muestra 1, para fuente monocromática se tiene que:

$$r'D = D \frac{L}{\cos \beta} = 1 \left[ \frac{\mu rad}{nm} \right] \frac{200 [mm]}{\cos 0.0483} = 0.0002 \left[ \frac{mm}{nm} \right] \quad (4.14)$$

Sin embargo es más usual encontrar al recíproco de la dispersión lineal, conocido como **Factor 'P'**, como un parámetro más común de las rejillas de difracción comerciales. En las rejillas comunes se buscan valores bajos de este parámetro, ya es una medida de la dispersión o "stray light" de longitud de onda cuando la luz es difractada en surcos o rendijas de un cierto ancho.

Entonces se tiene:

$$P = (r'D)^{-1} \quad (4.15)$$

En la muestra uno se tiene:

$$P = (0.00026634)^{-1} = 5000 \left[ \frac{nm}{mm} \right] \quad (4.16)$$

Por otro lado, la **magnificación anamórfica** se calcula como:

$$\frac{b}{a} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (4.17)$$

Y para la muestra 1, en donde  $\alpha=0$ :

$$\frac{b}{a} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} = \frac{\cos 0.0363}{\cos 0} = 1 \quad (4.18)$$

Los valores más comunes de magnificación anamórfica en rejillas comerciales típicas pueden ser variables, ya que depende en gran medida de la configuración de la instalación (ángulos de incidencia y difractados,  $\lambda$ ) en donde se utilice la rejilla. Sin embargo, es usual que los valores de este parámetro sean bajos cuando la rejilla de difracción se utiliza en configuraciones con un haz de luz incidente igual a cero y valores altos de separación angular  $\beta$  entre órdenes.

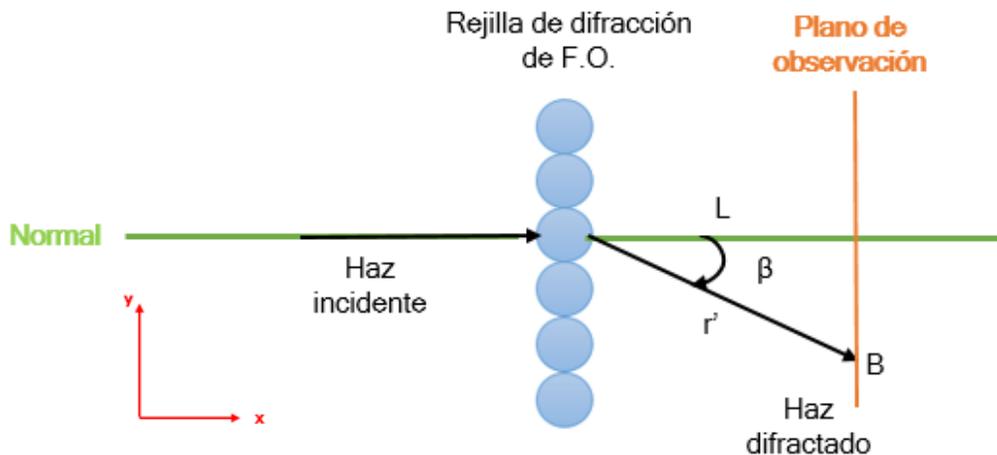


Figura 4.6 Esquema de difracción de las muestras experimentales.

## 4.2.4 Resultados teóricos de los parámetros de las rejillas de fibra óptica

### 4.2.4.1 Fuentes láser monocromáticas

Para el presente estudio, se utilizaron dos fuentes monocromáticas para la etapa experimental, ambas en el espectro visible. Es por esto que en la tabla 4.4 se muestran los valores teóricos de las muestras de fibra óptica calculados para longitudes de onda de 633 nm y 532 nm, utilizando  $m=1$ . Es común que se use el primer orden de difracción para el diseño y caracterización de las rejillas de difracción, ya que es el orden que se usa principalmente en diversas aplicaciones por los altos valores de intensidad que presenta. Sin embargo existen rejillas hechas especialmente para optimizar su patrón de intensidad y concentrar la intensidad en órdenes de difracción más altos, como es el caso de las rejillas Echelle.

Tabla 4.4 Parámetros teóricos de las muestras para  $m = 1$ .

Muestra	Rango de órdenes	$\beta$ [°]	$D$ $\left[\frac{\mu rad}{mm}\right]$	Factor $P$ $\left[\frac{nm}{mm}\right]$	Magnificación Anamórfica
<b><math>\lambda = 633 \text{ nm}</math></b>					
1	-3160 a +3160	0.0363	1	5000	1.000000
2	-790 a +790	0.1451	4	1249.99	0.999997
3	-395 a +395	0.2901	8	624.98	0.999987
4	-395 a +395	0.2901	8	624.98	0.999987
5	-158 a +158	0.7254	20	249.96	0.999920
<b><math>\lambda = 532 \text{ nm}</math></b>					
1	-3759 a +3759	0.0305	1	5000	1.000000
2	-940 a +940	0.1219	4	1249.99	0.999998
3	-470 a +470	0.2439	8	624.99	0.999991
4	-470 a +470	0.2439	8	624.99	0.999991
5	-188 a +188	0.6096	20	249.97	0.999943

### 4.2.4.2 Fuente de amplio espectro

En el caso del análisis teórico usando una fuente de amplio espectro se obtuvieron los datos de la Tabla 4.5 pertenecientes a las 5 muestras hechas de distintos tipos de fibra óptica. Esto se consiguió variando la longitud de onda desde 400 nm hasta 2500 nm en los cálculos, rango espectral de las fuentes de amplio espectro más comunes.

Tabla 4.5 Parámetros teóricos de las muestras para  $m = 1$ .

$\lambda$ [nm]	Rango de órdenes	$\beta^1$ [°]	$D$ [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor $P^2$ [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica <sup>3</sup>
<b>Muestra 1</b>					
400	-5000 a +5000	0.0229	1.0	1000.00	1.000000
550	-3636 a +3636	0.0315			1.000000
700	-2857 a +2857	0.0401			1.000000
850	-2353 a +2353	0.0487			1.000000
1000	-2000 a +2000	0.0573			0.999999
1150	-1739 a +1739	0.0659			0.999999
1300	-1538 a +1538	0.0745			0.999999
1450	-1379 a +1379	0.0831			0.999999
1600	-1250 a +1250	0.0917			0.999999
1750	-1143 a +1143	0.1003			0.999998
1900	-1053 a +1053	0.1089			0.999998
2050	-976 a +976	0.1175			0.999998
2200	-909 a +909	0.1261			0.999998
2350	-851 a +851	0.1346		999.99	0.999997
2500	-800 a +800	0.1432	0.999997		
<b>Muestra 2</b>					
400	-1250 a +1250	0.0917	4.0	250.00	0.999999
550	-909 a +909	0.1261			0.999998
700	-714 a +714	0.1604			0.999996
850	-588 a +588	0.1948			0.999994
1000	-500 a +500	0.2292			0.999992
1150	-435 a +435	0.2636		249.99	0.999989
1300	-385 a +385	0.2979			0.999986
1450	-345 a +345	0.3323			0.999983
1600	-313 a +313	0.3667			0.999980
1750	-286 a +286	0.4011			0.999975
1900	-263 a +263	0.4355			0.999971
2050	-244 a +244	0.4698		249.98	0.999966
2200	-227 a +227	0.5042			0.999961
2350	-213 a +213	0.5386			0.999956
2500	-200 a +200	0.5730			0.999950

<sup>1</sup> Los datos obtenidos de separación angular sugieren un cambio sutil al hacer variar la longitud de onda. El número de cifras significativas utilizadas tiene como propósito mostrar estos cambios, incluso para rangos espectrales más reducidos, como el caso del visible.

<sup>2</sup> Los cambios en el comportamiento de este parámetro es mínimo, sin embargo la utilización de hasta 5 cifras significativas en este caso tiene como objetivo mostrar la disminución del Factor P al incrementar la longitud de onda utilizada.

<sup>3</sup> La utilización de 6 cifras significativas tiene como objetivo mostrar la sutil disminución del parámetro de magnificación anamórfica cuando incrementa la longitud de onda.

Tabla 4.5 Parámetros teóricos de las muestras para  $m = 1$ . (continuación)

$\lambda$ [ nm ]	Rango de órdenes	$\beta$ [°]	$D$ $\left[ \frac{\mu rad}{nm} \right]$	Factor $P$ $\left[ \frac{nm}{mm} \right]$	Magnificación Anamórfica
<b>Muestra 3</b>					
400	-625 a +625	0.1833	8.0	125.00	0.999995
550	-455 a +455	0.2521			0.999990
700	-357 a +357	0.3209			0.999984
850	-294 a +294	0.3896		124.99	0.999977
1000	-250 a +250	0.4584			0.999968
1150	-217 a +217	0.5271			0.999958
1300	-192 a +192	0.5959			0.999946
1450	-172 a +172	0.6646		124.98	0.999933
1600	-156 a +156	0.7334			0.999918
1750	-143 a +143	0.8022			0.999902
1900	-132 a +132	0.8709		124.97	0.999884
2050	-122 a +122	0.9397			0.999866
2200	-114 a +114	1.0085		124.96	0.999845
2350	-106 a +106	1.0772			0.999823
2500	-100 a +100	1.1460		124.95	0.999800
<b>Muestra 4</b>					
400	-625 a +625	0.1833	8.0	125.00	0.999995
550	-455 a +455	0.2521			0.999990
700	-357 a +357	0.3209			0.999984
850	-294 a +294	0.3896		124.99	0.999977
1000	-250 a +250	0.4584			0.999968
1150	-217 a +217	0.5271			0.999958
1300	-192 a +192	0.5959			0.999946
1450	-172 a +172	0.6646		124.98	0.999933
1600	-156 a +156	0.7334			0.999918
1750	-143 a +143	0.8022			0.999902
1900	-132 a +132	0.8709		124.97	0.999884
2050	-122 a +122	0.9397			0.999866
2200	-114 a +114	1.0085		124.96	0.999845
2350	-106 a +106	1.0772			0.999823
2500	-100 a +100	1.1460		124.95	0.999800

Tabla 4.5 Parámetros teóricos de las muestras para  $m = 1$ . (continuación)

$\lambda$ [ nm ]	Rango de órdenes	$\beta$ [°]	$D$ [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor $P$ [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
<b>Muestra 5</b>					
400	-250 a +250	0.4584	20.0	50.00	0.999968
550	-182 a +182	0.6303		0.999939	
700	-143 a +143	0.8022		49.99	0.999902
850	-118 a +118	0.9741		0.999855	
1000	-100 a +100	1.1460		49.98	0.999800
1150	-87 a +87	1.3179		49.97	0.999735
1300	-77 a +77	1.4899			0.999662
1450	-69 a +69	1.6618		49.96	0.999579
1600	-63 a +63	1.8338		49.95	0.999488
1750	-57 a +57	2.0058		49.94	0.999387
1900	-53 a +53	2.1778		49.93	0.999278
2050	-49 a +49	2.3498		49.92	0.999159
2200	-45 a +45	2.5218		49.90	0.999032
2350	-43 a +43	2.6939		49.89	0.998895
2500	-40 a +40	2.8660		49.88	0.998749

#### 4.2.4.3 Fuente de amplio espectro: espectro visible

La presente investigación, delimita el estudio experimental de las rejillas de fibra óptica dentro del rango visible, por lo que resulta conveniente realizar el análisis teórico para estas longitudes de onda y así poder compararlas posteriormente con los resultados de la fase experimental. Para el análisis de las muestras en el rango del visible, que va desde 390 nm a 800 nm aproximadamente [5], se tendrían que considerar las longitudes de onda correspondientes para la realización de los cálculos teóricos.

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las muestras experimentales, calculados con las expresiones utilizadas a lo largo de este capítulo, variando la longitud de onda dentro del espectro visible y considerando el primer orden de difracción  $m=1$ .

Tabla 4.6 Parámetros teóricos en el espectro visible de las muestras para  $m = 1$ .

$\lambda$ [ nm ]	Rango de órdenes	$\beta$ [°]	$D$ [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor $P$ [ $\frac{mm}{nm}$ ]	Magnificación Anamórfica
<b>Muestra 1</b>					
390	-5128 a +5128	0.0223	1.0	1000.0	1.000000
425	-4706 a +4706	0.0244			
460	-4348 a +4348	0.0264			
475	-4211 a +4211	0.0272			
490	-4082 a +4082	0.0281			
520	-3846 a +3846	0.0298			
550	-3636 a +3636	0.0315			
570	-3509 a +3509	0.0327			
590	-3390 a +3390	0.0338			
615	-3252 a +3252	0.0352			
640	-3125 a +3125	0.0367			
720	-2778 a +2778	0.0413			
800	-2500 a +2500	0.0458			
<b>Muestra 2</b>					
390	-1282 a +1282	0.0894	4.0	250	0.999999
425	-1176 a +1176	0.0974			0.999999
460	-1087 a +1087	0.1054			0.999998
475	-1053 a +1053	0.1089			0.999998
490	-1020 a +1020	0.1123			0.999998
520	-962 a +962	0.1192			0.999998
550	-909 a +909	0.1261			0.999998
570	-877 a +877	0.1306			0.999997
590	-847 a +847	0.1352			0.999997
615	-813 a +813	0.1409			0.999997
640	-781 a +781	0.1467			0.999997
720	-694 a +694	0.1650			0.999996
800	-625 a +625	0.1833			0.999995

Tabla 4.6 Parámetros teóricos en el espectro visible de las muestras para  $m = 1$ . (continuación)

$\lambda$ [ nm ]	Rango de órdenes	$\beta$ [°]	$D$ [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor $P$ [ $\frac{mm}{nm}$ ]	Magnificación Anamórfica
<b>Muestra 3</b>					
390	-641 a +641	0.1788	8.0	125	0.999995
425	-588 a +588	0.1948			0.999994
460	-543 a +543	0.2108			0.999993
475	-526 a +526	0.2177			0.999993
490	-510 a +510	0.2246			0.999992
520	-481 a +481	0.2384			0.999991
550	-455 a +455	0.2521			0.999990
570	-439 a +439	0.2613			0.999990
590	-424 a +424	0.2704			0.999989
615	-407 a +407	0.2819			0.999988
640	-391 a +391	0.2934			0.999987
720	-347 a +347	0.3300			0.999983
800	-313 a +313	0.3667		124.99	0.999980
<b>Muestra 4</b>					
390	-641 a +641	0.1788	8.0	125	0.999995
425	-588 a +588	0.1948			0.999994
460	-543 a +543	0.2108			0.999993
475	-526 a +526	0.2177			0.999993
490	-510 a +510	0.2246			0.999992
520	-481 a +481	0.2384			0.999991
550	-455 a +455	0.2521			0.999990
570	-439 a +439	0.2613			0.999990
590	-424 a +424	0.2704			0.999989
615	-407 a +407	0.2819			0.999988
640	-391 a +391	0.2934			0.999987
720	-347 a +347	0.3300			0.999983
800	-313 a +313	0.3667		124.99	0.999980

Tabla 4.6 Parámetros teóricos en el espectro visible de las muestras para  $m = 1$ . (continuación)

$\lambda$ [ nm ]	Rango de órdenes	$\beta$ [°]	$D$ [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor $P$ [ $\frac{mm}{nm}$ ]	Magnificación Anamórfica
<b>Muestra 5</b>					
390	-256 a +256	0.4469	20.0	50	0.999970
425	-235 a +235	0.4870			0.999964
460	-217 a +217	0.5271			0.999958
475	-211 a +211	0.5443			0.999955
490	-204 a +204	0.5615			0.999952
520	-192 a +192	0.5959			0.999946
550	-182 a +182	0.6303		49.99	0.999939
570	-175 a +175	0.6532			0.999935
590	-169 a +169	0.6761			0.999930
615	-163 a +163	0.7048			0.999924
640	-156 a +156	0.7334			0.999918
720	-139 a +139	0.8251			0.999896
800	-125 a +125	0.9168			0.999872

### 4.3 Conclusiones

En este capítulo se presentó el proceso de diseño y fabricación de las rejillas de fibra óptica para su uso con fuentes monocromáticas y de amplio espectro. Las rejillas experimentales de fibra óptica elaboradas tienen una densidad de surcos pequeña, comparada a la densidad de surcos que tienen algunas rejillas de difracción comerciales las cuales tienen usualmente 40 líneas por milímetro o más. La separación angular calculada fue menor a  $1^\circ$  para algunas longitudes de onda, sobre todo en el espectro visible, aunque se puede notar que a medida que la longitud de onda aumenta, la separación angular también lo hace.

Una de las cualidades que se suele buscar en una rejilla de difracción, es que su capacidad para dispersar la luz sea grande. En el caso de las rejillas fabricadas con arreglos de fibra óptica no se obtuvieron grandes valores de dispersión angular, sin embargo se mostró que al incrementar el valor de la densidad de surcos, también aumenta la dispersión angular, teniendo entonces dispersiones angulares mayores en las muestras hechas con fibra óptica más delgada.

Se obtuvieron los parámetros teóricos de todas las muestras, en donde se consideraron longitudes de onda individuales de 633 nm y 532 nm, longitudes de onda que emiten las fuentes láser monocromáticas que se proponen en la etapa experimental, que posteriormente se describirá. También se consideraron dos rangos espectrales distintos: el producido por una fuente de supercontinuo (400 nm - 2500 nm) y el visible (300 nm - 800 nm), ya que son rangos de especial importancia para esta investigación.

Habiendo obtenido teóricamente las características físicas de las muestras experimentales y sus principales parámetros, en el siguiente capítulo se procede a una etapa experimental con el propósito de conocer el comportamiento real de las rejillas fabricadas, comparar los resultados y disertar acerca de ellos.

#### 4.4 Referencias del capítulo 4

- [1] Fibraoptica.blog.tartanga.net, (2016). *Fundamentos de las Fibras Ópticas / Proyecto Innovación sobre Fibra y Redes*. [online] Disponible en: <http://fibraoptica.blog.tartanga.net/fundamentos-de-las-fibras-opticas/> [Revisado el 9 Septiembre 2015].
- [2] U.H.P. Fischer, M. (2016). *WDM over POF - The inexpensive way to break through the limitation of bandwidth of standard POF communication*. [online] Harzoptics.de. Disponible en: <http://www.harzoptics.de/wdm-over-pof.html> [Revisado el 9 Septiembre 2015].
- [3] FSI,. (2015). *Bulk Fiber - FSI*. Revisado el 9 Septiembre 2015, disponible en: <http://www.fiberopticsystems.com/bulk-fiber/>
- [4] Imagej.nih.gov, (2016). *ImageJ*. [online] Disponible en: <http://imagej.nih.gov/ij/index.html> [Revisado el 9 Septiembre 2015].
- [5] Johansson, D. (2015). *The Physics of Color - the Color Wheel and Color Spectrum*. *Colorsontheweb.com*. Revisado el 9 Septiembre 2015, disponible en: <http://colorsontheweb.com/colorinformation.asp>

## CAPÍTULO 5

### Estudio experimental del demultiplexado en un sistema láser de amplio espectro con rejillas de difracción basadas en fibra óptica

#### 5.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño e implementación de una instalación experimental para evaluar el comportamiento y el desempeño real de las rejillas de difracción de fibra óptica, así como el proceso experimental que se llevó a cabo para tales propósitos.

La segunda parte de este capítulo presenta el estudio de simulación numérica realizado en una instalación virtual utilizando el software TracePro, una herramienta para el análisis y diseño de sistemas ópticos y de iluminación, se incluye la descripción de los prototipos virtuales, las pruebas dentro del entorno numérico con interfaz gráfica y la obtención de resultados.

#### 5.2 Estudio experimental

La etapa experimental y las simulaciones en este estudio, considera la realización de una instalación para observar el fenómeno de difracción producido por las rejillas construidas con arreglos de fibra óptica. Para este propósito se plantean dos métodos:

- Realización de una instalación real experimental
- Implementación de una instalación virtual por medio de simulador

La instalación real experimental considera elementos ópticos reales, para obtener y evaluar diferentes parámetros de las rejillas de difracción en estudio. Por otro lado, el simulador tiene como propósito la obtención de datos teóricos para la verificación de grado de coincidencia de las predicciones teóricas con el experimento.

##### 5.2.1 Descripción de la instalación real experimental

En el presente estudio se utilizaron dos clases de fuentes láser: monocromáticas y de amplio espectro, con la finalidad de observar, analizar y comparar el comportamiento de las rejillas de difracción al trabajar en diferentes rangos espectrales. Esto provee de datos útiles para futuras aplicaciones en el régimen del supercontinuo y para aplicaciones que consideren intervalos estrechos de longitudes de onda.

El esquema general que se planteó está ilustrado en la Figura 5.1, la cual contiene los siguientes elementos:

- Fuente láser
- Lente convergente
- Rejilla de difracción de fibra óptica
- Plano de observación
- Postes de soporte para elementos ópticos
- Una base de soporte de los elementos del arreglo experimental

La configuración de la instalación experimental, plantea un haz monocromático o policromático proveniente de una fuente láser que pasa a través de un lente convergente e incide en la rejilla de difracción. La rejilla de difracción posteriormente separa al haz de luz en distintos órdenes, los cuales pueden ser vistos a lo largo de un plano de observación colocado detrás de la rejilla.

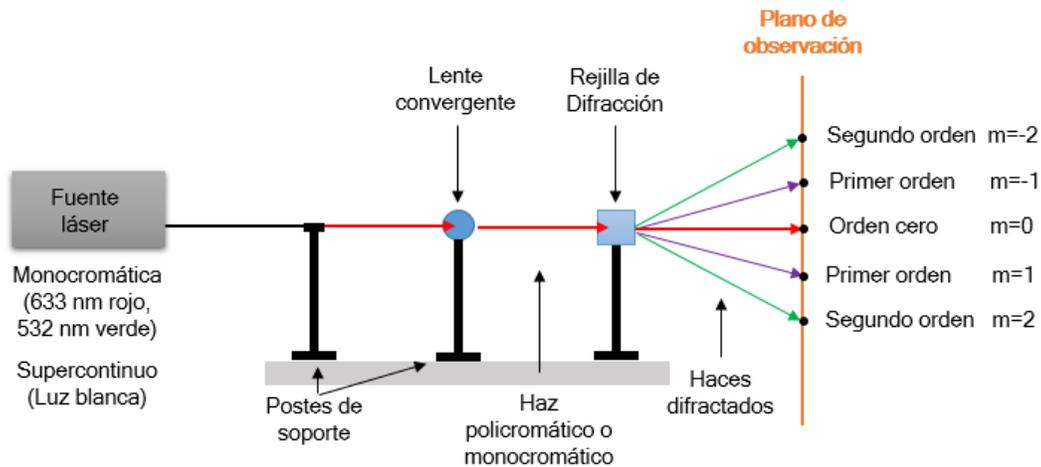


Figura 5.1 Esquema del experimento para observar la difracción.

### 5.2.1.1 Fuente láser

Las fuentes láser monocromáticas utilizadas en el experimento se encuentran en el rango del espectro visible y emiten longitudes de onda en 633 nm y 532 nm. Se utiliza cada una por separado para observar el comportamiento de las muestras experimentales al ser expuestas a longitudes de onda distintas.

Por otro lado, el sistema láser de amplio espectro, emite en un rango de longitudes de onda de 450 nm a 2400 nm. Se hace incidir el haz de la fuente de amplio espectro sobre la rejilla, que a diferencia de las fuentes monocromáticas, abarca una gran cantidad de longitudes de onda. En la Tabla 5.1 se muestran las características de las fuentes utilizadas para este estudio y en la Figura 5.2 se muestran sus respectivos espectros de emisión.

Tabla 5.1 Características de las fuentes láser.

Tipo de Fuente	Compañía	Modelo	$\lambda$ [ nm]	Diámetro del haz [mm]	Divergencia del haz [mrad]	Potencia [mW]	Imagen
Monocromática	JDS Uniphase [1]	1507 Series Novette Laser Systems	633	0.48	1.7	0.8	
Monocromática	Oxlasers [2]	OX-G032	532	1.1	1	<30	
Amplio Espectro	NKT Photonics [3]	SuperK COMPACT	450-2400	1-3 (colimado)	<5	<100	

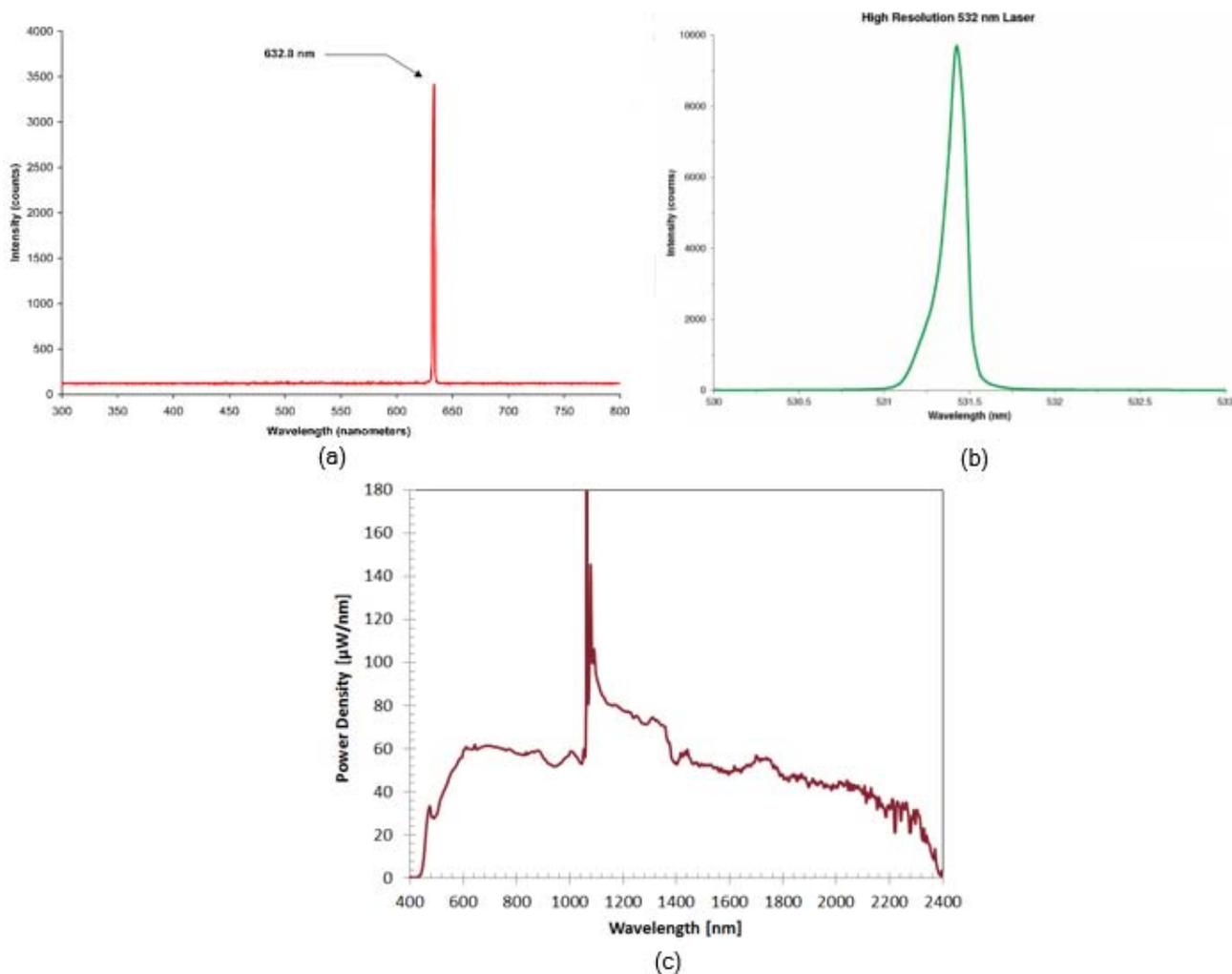


Figura 5.2 Espectros de emisión de fuentes láser de (a) 633 nm (b) 532 nm y (c) amplio espectro.

### 5.2.1.2 Lente convergente

Otro de los elementos de la instalación, es un elemento óptico comúnmente denominado como lente convergente. Éste lente tiene como finalidad converger el haz de luz incidente, que proviene de una de las fuentes láser, en un área reducida de la rejilla de difracción, para aumentar en esa área la densidad de la intensidad luminosa y hacer más nítido el fenómeno de difracción. La Tabla 5.2 resume las principales características del lente convergente utilizado en la instalación experimental, con el cual se obtuvo un diámetro de haz incidente de aproximadamente 1mm en la rejilla.

Tabla 5.2 Características del lente convergente.

Elemento	Compañía	Modelo	Material	$\lambda$ de diseño [nm]	Diámetro [mm]	Distancia Focal [mm]	Imagen
Lente biconvexo	Thorlabs [4]	LB1761-B	N-BK7	650-1050 nm	25.4	25.4	

### 5.2.1.3 Rejilla de difracción

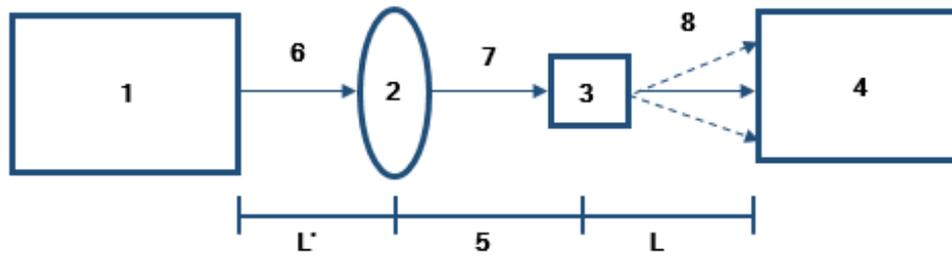
Las rejillas de difracción que se evalúan en la fase experimental de este estudio, están construidas con arreglos de fibra óptica (para la descripción de las rejillas, sus parámetros y las técnicas de su fabricación, véase el capítulo 4). La rejilla se suspende sobre una base fija y se hace incidir al haz luminoso de forma perpendicular al arreglo de fibras.

### 5.2.1.4 Plano de observación

En la instalación experimental se cuenta con una pantalla en el plano de observación, en donde se observan los diferentes órdenes de difracción que surgen de las muestras de rejillas. La rejilla difracta en diferentes órdenes al haz incidente y los proyecta en este plano para su posterior evaluación y análisis. Este plano de observación es paralelo al plano en donde se encuentra la rejilla, es colocado a una determinada distancia detrás de ella y es de color oscuro para facilitar la observación del fenómeno de difracción, puesto que las fuentes luminosas son muy brillantes.

### 5.2.1.5. Distancias entre elementos

Existe una distancia denominada  $L'$  de 100mm entre la salida de la fuente láser monocromática y el lente convergente (o de 25.4mm al utilizar la fuente de amplio espectro). La fuente de amplio espectro no cuenta con una terminación colimada y tiende a ensanchar el haz de luz blanca, por lo que es recomendable tener una separación igual a la distancia focal entre la fuente y el lente convergente en este caso. El lente convergente y la rejilla se encuentran separados por 25.4mm, ya que esa es la distancia focal del lente. Finalmente se tiene una distancia denominada  $L$  de 200mm o 1000mm entre la rejilla de difracción y el plano de observación cuando se experimenta con una fuente monocromática o de amplio espectro respectivamente. La configuración descrita se ilustra en la Figura 5.3.



- 1 - Fuente láser (633 nm/532 nm/SC).
- 2 - Lente convergente.
- 3 - Rejilla de difracción experimental.
- 4 - Plano de observación
- 5 - Distancia variable (0-200mm) por medio de un riel graduado.
- 6 - Emisión láser monocromática o de amplio espectro ( $L'$  de 100mm/25.4mm respectivamente).
- 7 - Haz láser convergente (distancia entre el lente y la rejilla de 25.4mm).
- 8 - Órdenes de difracción ( $L$  con fuente monocromática o de amplio espectro de 200mm/1000mm respectivamente).

Figura 5.3 Diagrama de la instalación experimental con distancias.

## 5.2.2 Implementación del experimento

La implementación del experimento se hizo sobre una base (mesa óptica) en donde se colocaron los distintos elementos ópticos y fuentes de luz que lo constituyen. Se realizó la alineación de los elementos para disminuir el esparcimiento de la luz en las diferentes etapas de la instalación. En las Figuras 5.4 a 5.6 se ilustran las configuraciones para cada una de las fuentes láser.

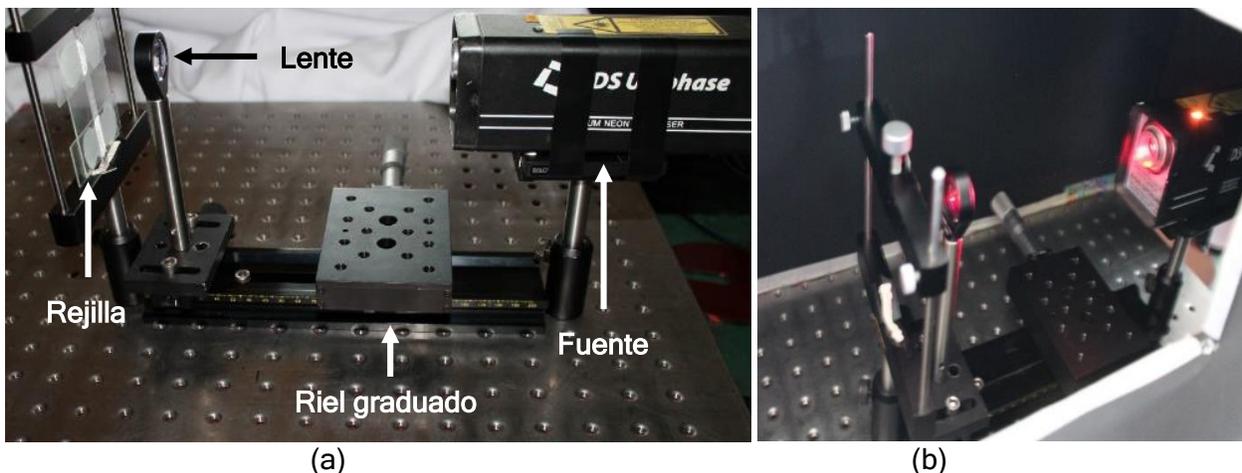


Figura 5.4 Instalación experimental con fuente de  $\lambda=633$  nm: (a) alineación de elementos, (b) instalación en funcionamiento.

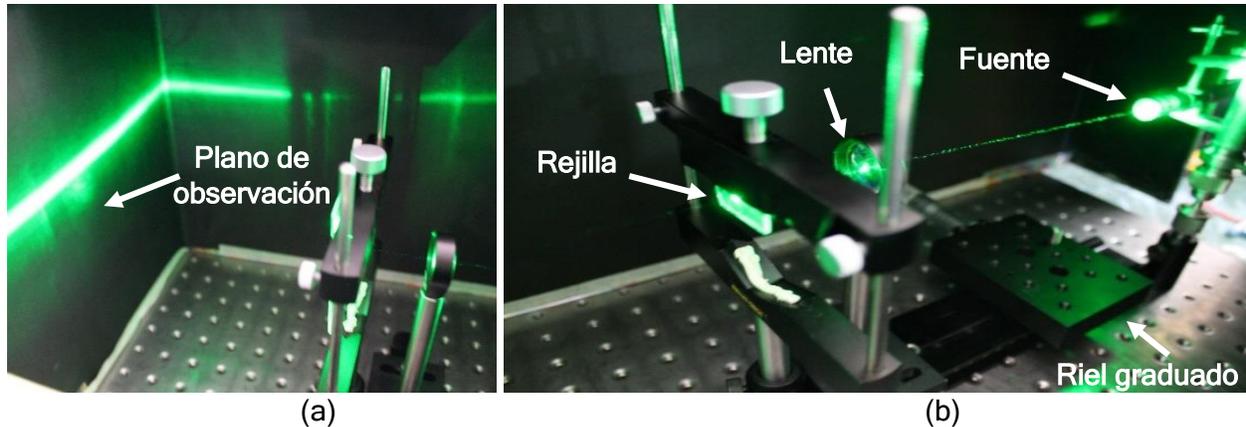


Figura 5.5 Instalación experimental con fuente de  $\lambda=532$  nm: (a) alineación de elementos, (b) instalación en funcionamiento.

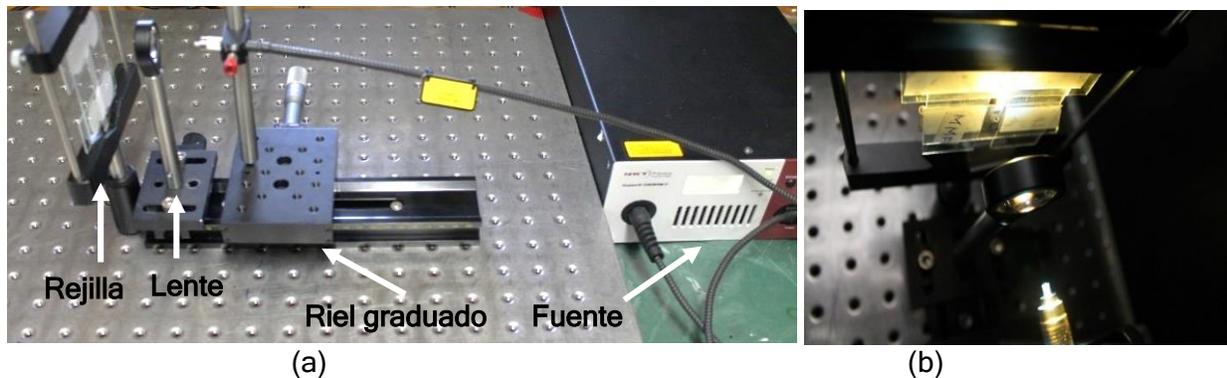


Figura 5.6 Instalación experimental con fuente de amplio espectro: (a) alineación de elementos, (b) instalación en funcionamiento.

### 5.2.3 Toma de datos experimentales

Un parámetro característico y determinante de las rejillas, es el valor de la separación angular de los órdenes de difracción. A partir de este valor se pueden calcular parámetros más complejos como la dispersión angular, el Factor P y la magnificación anamórfica sin la necesidad de tener instrumentación especializada para tales efectos. Por lo que se obtuvieron los valores característicos de la separación angular del primer orden de difracción para cada muestra experimental a evaluar.

#### 5.2.3.1. Experimentación con fuentes monocromáticas

En la Figura 5.7 se muestra un esquema que ilustra la toma de datos, se omiten los rayos difractados de alto orden para facilitar la explicación. En esta ilustración,  $\beta$  es la separación angular del haz difractado medida en grados respecto a la normal de la rejilla y B es el punto de intersección entre el haz difractado de primer orden y el plano de observación. Mediante esta configuración y por geometría se puede calcular el ángulo  $\beta$  resultante por medio de la siguiente expresión:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{c}{L} \right) \quad (5.1)$$

El parámetro  $c$  es la distancia entre el orden cero y el primer orden de difracción, ambos ubicados en el plano de observación, que en este caso se obtendrá experimentalmente.

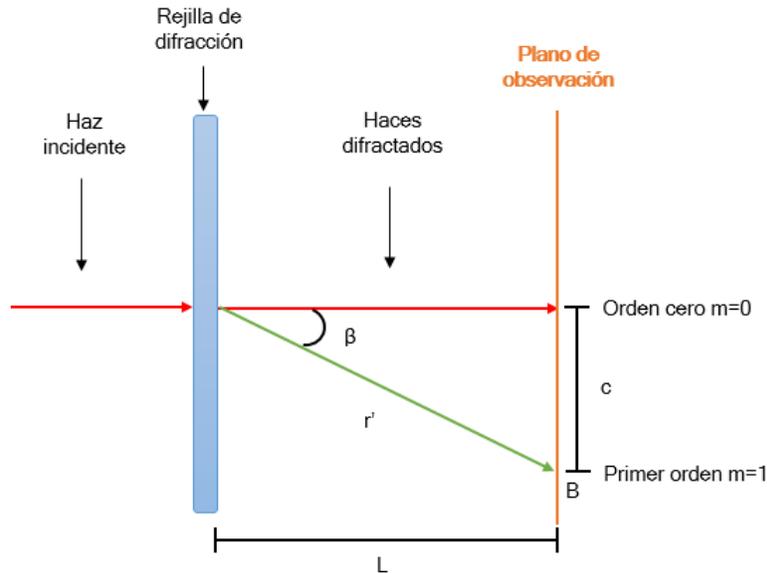


Figura 5.7 Esquema de toma de datos en el caso de una fuente monocromática.

### 5.2.3.2. Experimentación con el sistema láser de amplio espectro

La difracción en el caso de una fuente de amplio espectro ilustra la Figura 5.8, en donde los diversos órdenes de difracción están compuestos por varios intervalos de longitudes de onda distintas, no sólo en el rango visible sino también parte del infrarrojo hasta  $2.4 \mu\text{m}$ , puesto que la fuente de amplio espectro emite en un rango de  $450 \text{ nm}$  a  $2400 \text{ nm}$ .

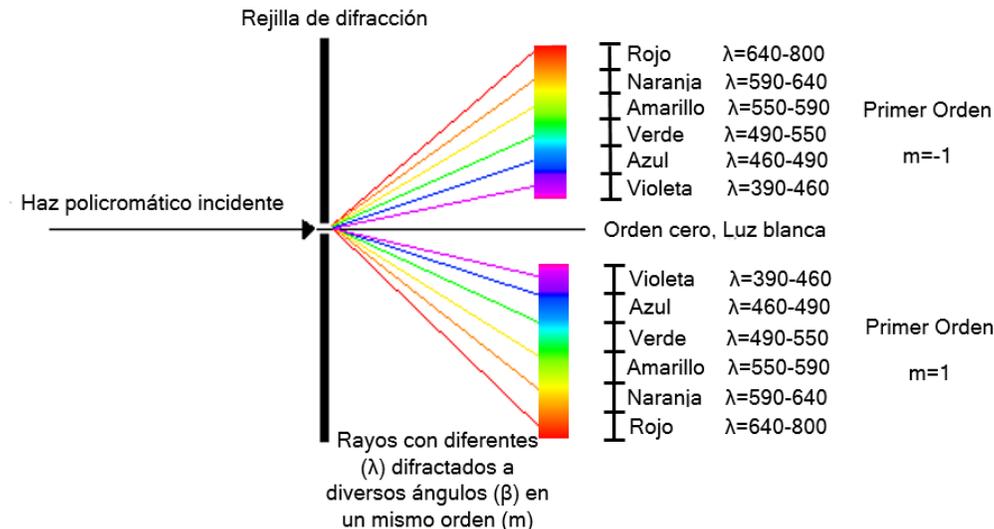


Figura 5.8 Esquema del fenómeno de difracción en el caso de una fuente de amplio espectro.

La toma de datos en este caso consiste en la medición de la separación angular de los rayos difractados  $c$ , luego se calcula el ángulo  $\beta$ ; se toma en cuenta que el parámetro  $c$  ahora se ubicaría entre cada componente espectral difractado y el orden cero.

En la Figura 5.9 se muestra el ejemplo de como calcular la distancia  $c$  en la franja del visible denominada como amarillo, la medición se realiza a partir del orden cero hasta la mitad del rango del color y se omite el orden  $m=-1$  para facilitar la explicación. Las distancias que se determinan experimentalmente se localizan al inicio, al final y en una posición media de cada franja de color, para poder determinar el inicio y el término de cada grupo de longitudes de onda dentro del espectro visible. Como ejemplo para la Figura 5.9, se toman los valores de tres distancias diferentes, al inicio, a la mitad y al final de la franja que se denomina como amarillo, al cual le corresponden de forma aproximada las longitudes de onda 550 nm, 570 nm y 590 nm respectivamente. Una vez determinados los parámetros experimentales de cada una de las muestras utilizando las fuentes monocromáticas y la de amplio espectro, se procede a la realización del análisis de los valores arrojados, parte del estudio que se desarrollará en el siguiente capítulo.

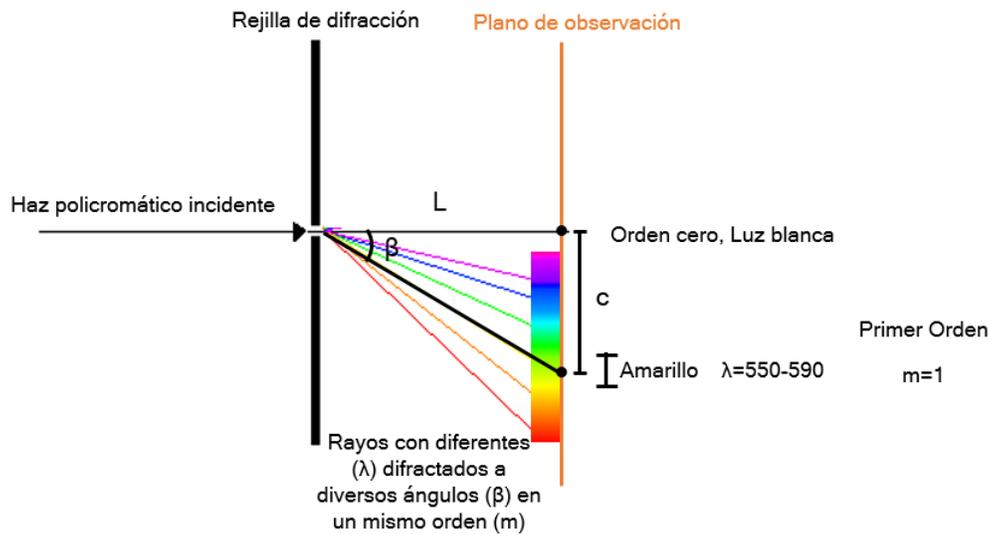


Figura 5.9 Esquema de toma de datos en el caso de una fuente de amplio espectro.

### 5.3 Estudio por medio de simulación numérica

En esta sección se describe la simulación realizada por medio de un software especializado en diseño y análisis de elementos ópticos. Para estas pruebas, se seleccionó el software llamado TracePro [5], un programa que permite la creación de un ambiente virtual para el desarrollo y simulación de elementos ópticos experimentales. TracePro utiliza el método de trazado de rayos para encontrar distribuciones de energía sobre distintas clases de superficies. En este estudio, el software se utiliza para observar el fenómeno de difracción producido por las rejillas de fibra óptica, específicamente para obtener planos de irradiancia, la distancia entre órdenes de difracción y finalmente comparar la simulación con los resultados teóricos y experimentales.

#### 5.3.1 Descripción de la instalación virtual

La configuración básica empleada en las simulaciones contiene una fuente luminosa que hace incidir un haz de luz transversalmente sobre un arreglo de fibras ópticas, el cual funciona como rejilla de difracción y produce un patrón de difracción en un plano de observación ubicado a cierta distancia detrás de la rejilla. Se obtuvo por medio del programa, un plano de irradiancia, un gráfico del patrón de intensidad y los valores de las distancias entre órdenes de difracción para cada una de las muestras experimentales en estudio.

### 5.3.1.1 Fuente luminosa

La fuente luminosa es denominada como fuente de rejilla por el programa TracePro. Esta fuente se puede configurar aplicando propiedades como longitud de onda, posición de origen en tres dimensiones y diámetro del haz luminoso, entre otros parámetros. La longitud de onda que se asigna para el caso de la simulación con fuentes monocromáticas es de 633 nm o 532 nm. Para las pruebas con una fuente de amplio espectro se agregan múltiples fuentes luminosas con diversas longitudes de onda dentro de un rango específico, en este caso dentro del espectro visible entre 460 nm a 800 nm. Todas las fuentes se colocan en la misma posición para que el conjunto de todas ellas produzca luz blanca. Las diversas fuentes se colocan a 25.4 mm de distancia de la rejilla de difracción y se configuran de tal manera que los rayos provenientes de las mismas puedan incidir perpendicularmente sobre el arreglo de fibras.

Se realizan consideraciones especiales respecto al diámetro de la fuente luminosa. En primer lugar se supone una configuración que incluye un lente para hacer converger el haz luminoso, tal como se hizo en la instalación física experimental. En este caso se puede calcular el diámetro del haz de luz en el punto más estrecho después de pasar por un lente y omitir la integración del lente en la simulación, a partir de la expresión para divergencia de haz. Siendo  $d_f$  el diámetro del punto más estrecho después de un lente,  $D$  la divergencia del haz láser y  $f$  el punto focal del lente, la expresión para divergencia de un haz queda expresada como:

$$d_f = D * f \quad (5.2)$$

Para la longitud de onda de 633 nm, se tiene una divergencia de 1.7mrad y para el láser con longitud de onda de 532 nm se tiene una divergencia de 1mrad. La fuente de supercontinuo marca un rango de divergencia el cual es  $< 5\text{mrad}$  y la distancia focal del lente utilizado en la instalación experimental es de 25.4mm.

Entonces se tiene que:

$$\left. \begin{aligned} d_{F(633 \text{ nm})} &= (1.7 \text{ mrad}) * (25.4 \text{ mm}) = 0.04318 \text{ mm} \\ d_{F(532 \text{ nm})} &= (1 \text{ mrad}) * (25.4 \text{ mm}) = 0.0254 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Y en las simulaciones se ingresa el radio de la fuente luminosa, siendo estos:

$$\left. \begin{aligned} r_{F(633 \text{ nm})} &= \frac{0.04318 \text{ mm}}{2} = 0.02159 \text{ mm} \\ r_{F(532 \text{ nm})} &= \frac{0.0254 \text{ mm}}{2} = 0.0127 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Sin embargo, es conveniente tener en cuenta que el diámetro de haz obtenido en la expresión 5.3 es menor al diámetro de las fibras ópticas que forman parte de las rejillas de difracción. Entonces la simulación consideraría el fenómeno que se produce cuando un haz de luz pasa transversalmente por una sola fibra óptica. El comportamiento que tiene una fibra óptica cuando un haz de luz pasa transversalmente a través de ella resulta de gran importancia para entender el funcionamiento del prototipo, sin embargo, es aún más trascendental el comportamiento que tiene un conjunto de varias fibras ópticas cuando un haz de luz pasa a través de ellas de forma simultánea. Es por esto que además se propone la simulación con un diámetro de haz mayor a los obtenidos en la expresión 5.3, considerándolo igual a 1mm, que fue aproximadamente el valor real utilizado en la instalación física de este estudio.

### 5.3.1.2 Rejilla de difracción

Para la realización de los modelos virtuales de rejillas de difracción de fibra óptica se usa la interfaz gráfica que proporciona el software. Es importante considerar la geometría y especificaciones de cada uno de los tipos de fibra óptica que se utilizaron, descritos en el Capítulo 4. Los prototipos virtuales se configuran para que coincidan con las muestras experimentales agregando propiedades y medidas específicas a los materiales de cada arreglo de fibras ópticas, las cuales se muestran en la Tabla 5.3 ( $n_1$  es el índice de refracción del núcleo y  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento).

Tabla 5.3 Características de las fibras ópticas utilizadas en TracePro

Muestra	Tipo de Fibra óptica	Materiales utilizados	Diámetro del núcleo [mm]	Diámetro total [mm]	$n_1$	$n_2$
1	POF	PMMA	0.98	1	1.49	1.41
2	POF	PMMA	0.24	0.25	1.49	1.41
3	MMF	Sílice	0.050	0.125	1.46	1.45
4	SMF	Sílice	0.009	0.125	1.49	1.48
5	Microhilos	Borosilicato	0.050	0.050	1.51	-

La primer etapa para la creación de las rejillas de difracción de fibra óptica mediante el simulador, es la creación de la geometría de cada una de las fibras. Mediante la interfaz de TracePro se pueden realizar cuerpos hechos de diversos materiales con índices de refracción específicos. En este caso para hacer cada una de las fibras ópticas que forman a la rejilla, se utilizaron dos cuerpos denominados tubos y sólidos primitivos de forma cilíndrica para simular el revestimiento y núcleo respectivamente. Puede aplicarse transparencia a un objeto, para observar lo que sucede al interior de las fibras cuando incide un haz de luz sobre ellas y es posible colocar varias fibras de forma adyacente para que formen una rejilla de difracción. Este procedimiento se realiza para cada una de las muestras, teniendo en cuenta las particularidades de cada una de ellas, cambiando los materiales, índices de refracción y medidas. En las Figuras 5.10 a 5.14 se pueden observar las imágenes de los prototipos virtuales construidos con el procedimiento mencionado.

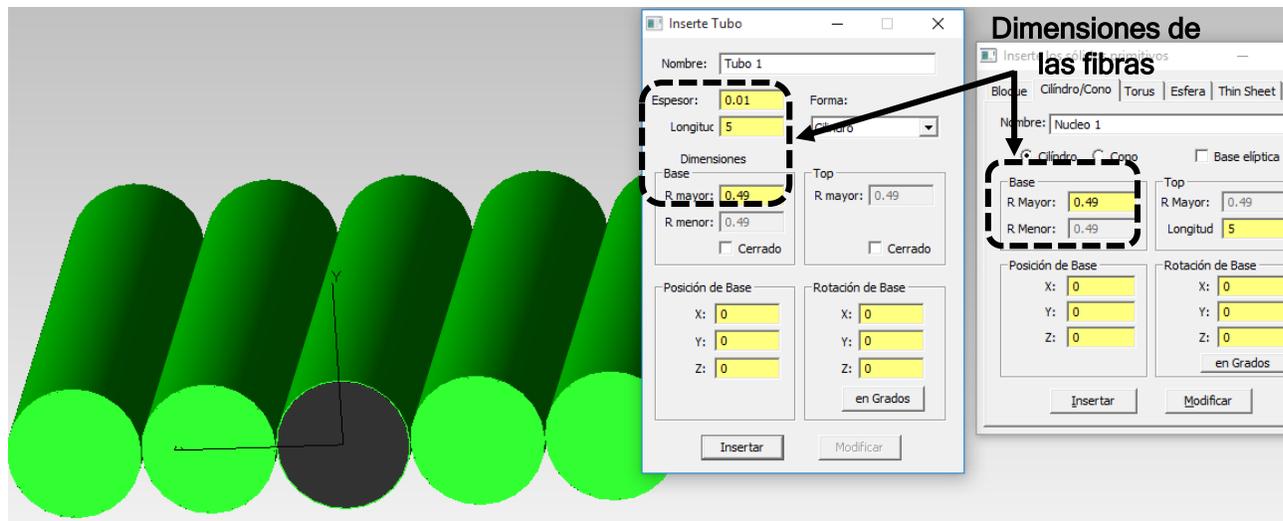


Figura 5.10. Creación de la geometría del arreglo de fibras ópticas en TracePro de la muestra 1.

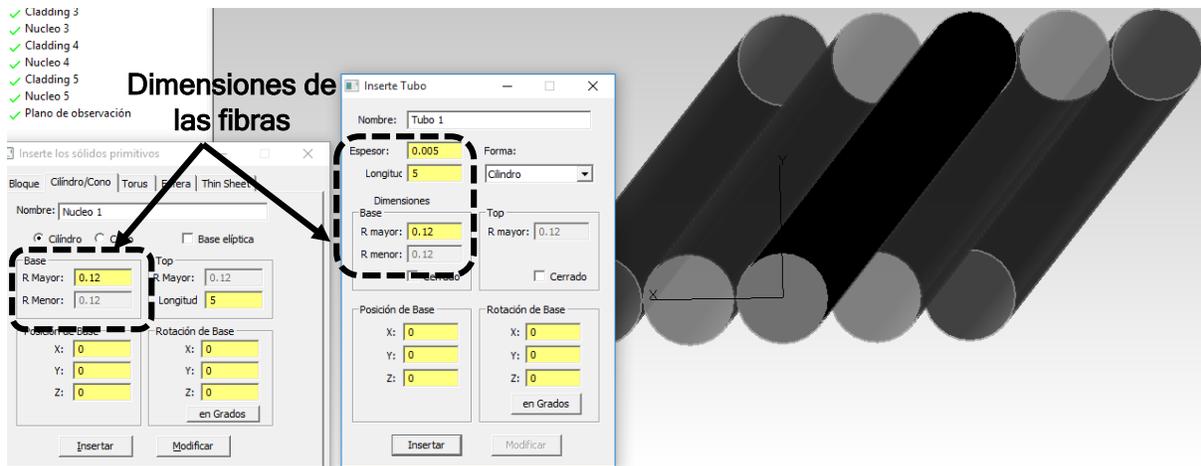


Figura 5.11. Creación de la geometría del arreglo de fibras ópticas en TracePro de la muestra 2.

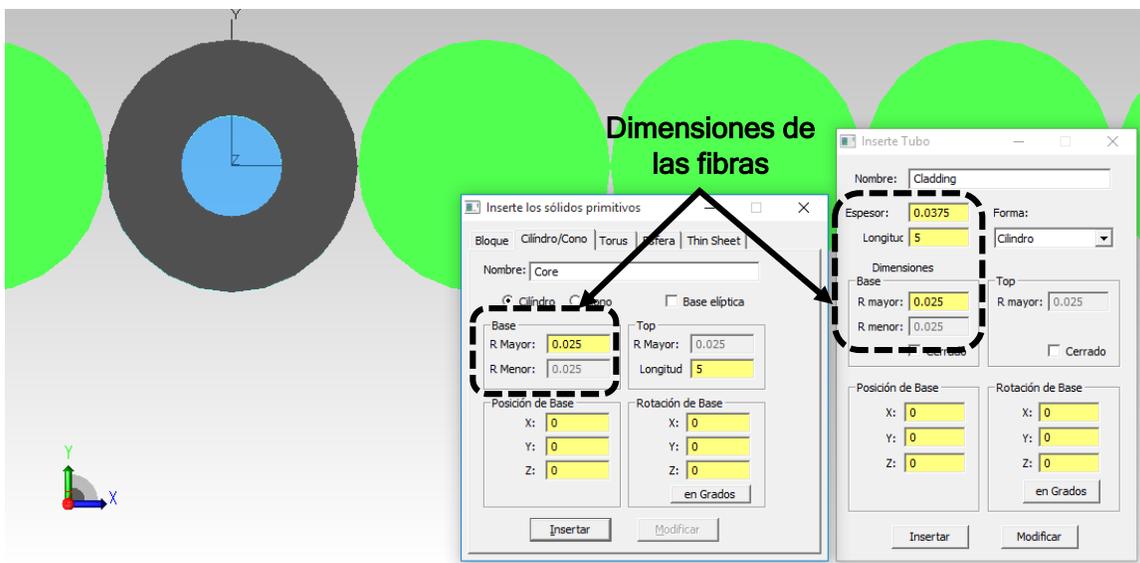


Figura 5.12. Creación de la geometría del arreglo de fibras ópticas en TracePro de la muestra 3.

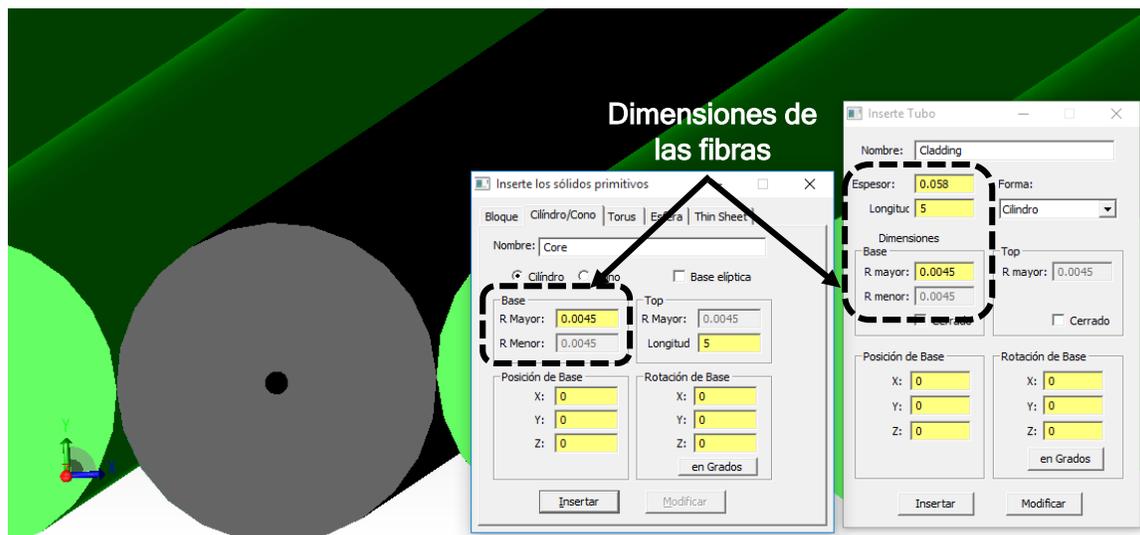


Figura 5.13. Creación de la geometría del arreglo de fibras ópticas en TracePro de la muestra 4.

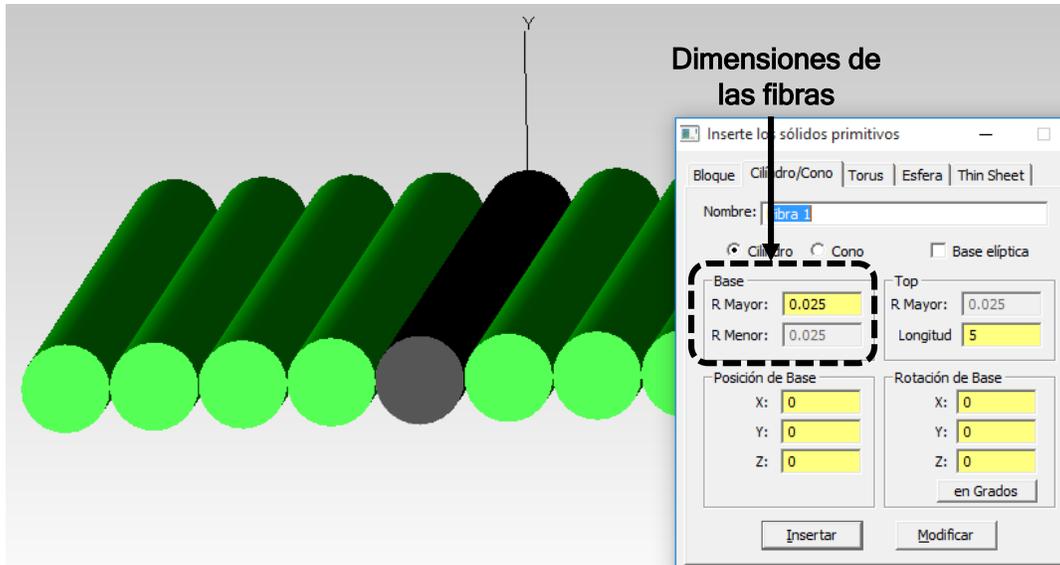


Figura 5.14. Creación de la geometría del arreglo de fibras ópticas en TracePro de la muestra 5.

### 5.3.1.3 Plano de observación

En las pruebas mediante simulador también resulta necesario un plano de observación para poder obtener las características del fenómeno de difracción producido por las rejillas de fibra óptica. Para la creación del plano de observación en la interfaz gráfica, se define una nueva geometría en forma de bloque definido en tres dimensiones como se ilustra en la Figura 5.15. Se aleja a una distancia de 200mm o 1000mm de la rejilla de difracción, ya que así se definió la configuración para las pruebas experimentales con fuentes monocromáticas o de amplio espectro respectivamente.

Es por medio de este plano que se pueden obtener datos acerca del patrón de difracción producido por las rejillas, incluyendo gráficos de intensidad y valores de las distancias entre órdenes. Al utilizarlo como una referencia no es necesario ajustar características como índice de refracción o transparencia del material.

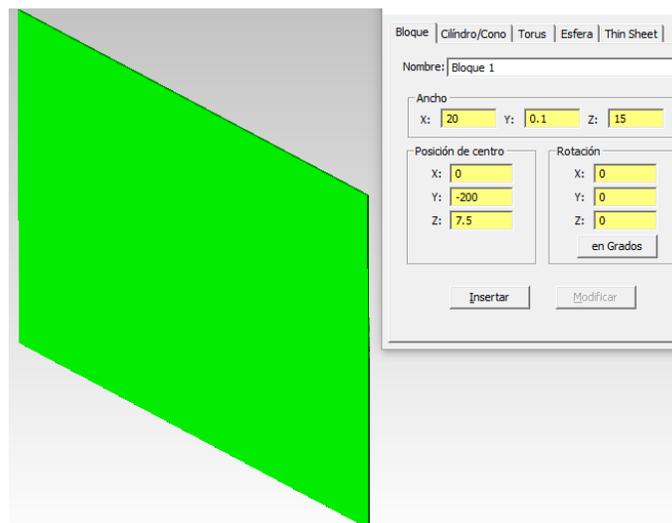


Figura 5.15. Creación del plano de observación en TracePro.

### 5.3.2 Ejecución de la simulación

En la Figura 5.16 se muestra un ejemplo del proceso de ejecución con la interfaz gráfica del software en donde se observa el arreglo de fibras ópticas de la muestra 4 en color verde dispersando el haz de luz incidente y al fondo el plano de observación.

El proceso de simulación se realizó para cada una de las muestras de rejilla de fibra óptica, y se obtuvo el comportamiento de las mismas al hacer incidir un haz luminoso con diámetro menor al de las fibras. También se hicieron pruebas que mostraran los efectos de hacer incidir al haz luminoso sobre varias fibras de forma simultánea, cambiando el diámetro del haz para este propósito. En las Figuras 5.17 y 5.18 se concentran las imágenes de las simulaciones para las cinco muestras cuando el haz incide sobre el centro de una sola fibra y cuando el haz incide sobre varias a la vez, respectivamente. Adicionalmente se hizo incidir un haz de luz entre las fibras para observar su comportamiento y trayectoria, se muestran los resultados de esta configuración en la Figura 5.19. En el siguiente capítulo se retoman las observaciones hechas de las simulaciones y se discuten con más detalle los resultados obtenidos.

El software puede indicar rayos de color rojo, verde o azul, los cuales indican la cantidad relativa del flujo que poseen. Los rayos en color rojo son los de mayor flujo teniendo entre 66% y 100% del máximo que produce la fuente luminica, los verdes tienen entre 33% y 66% del flujo y los azules entre 0% y 33%.

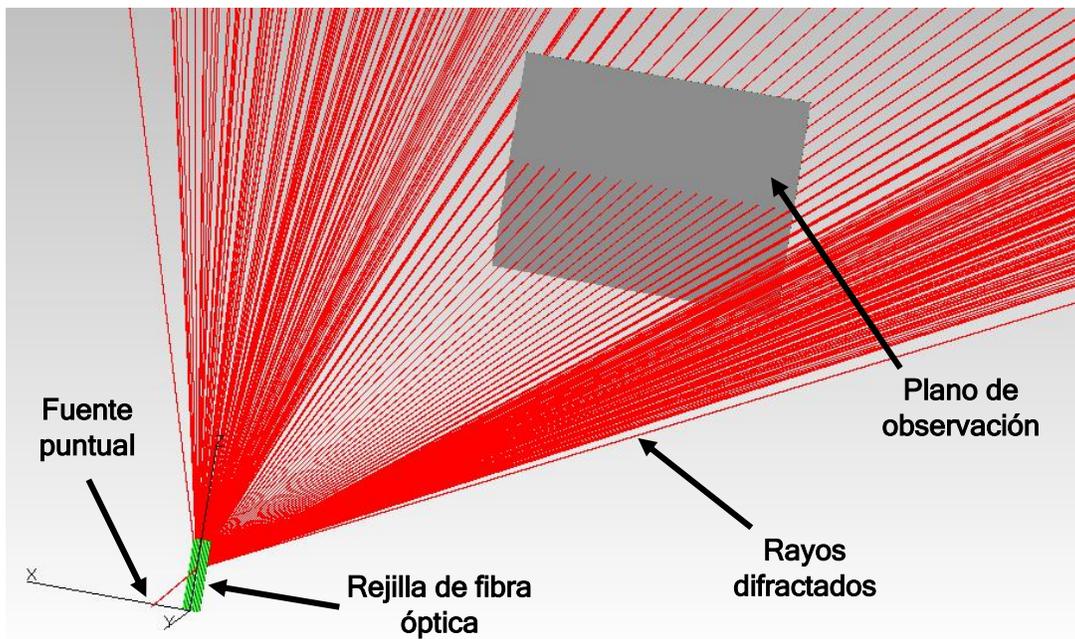
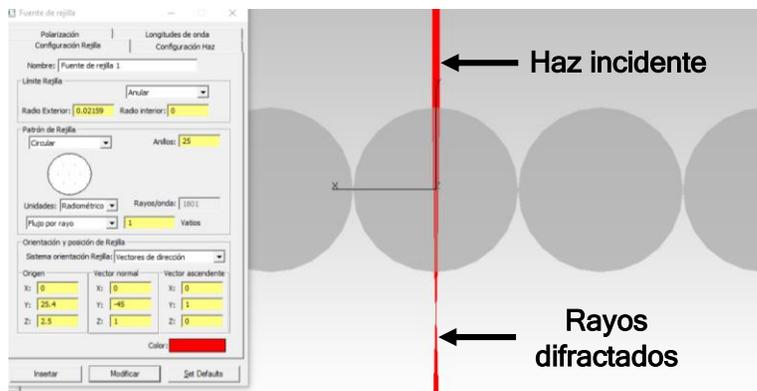
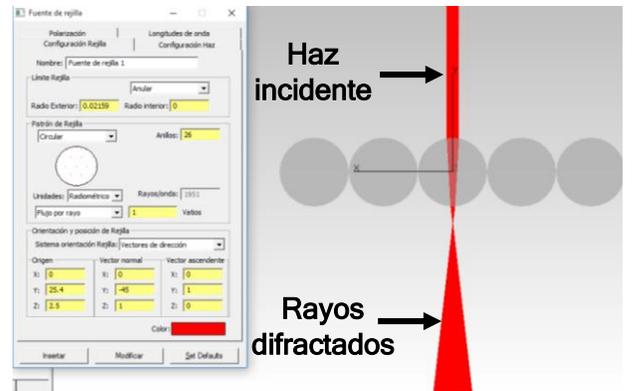


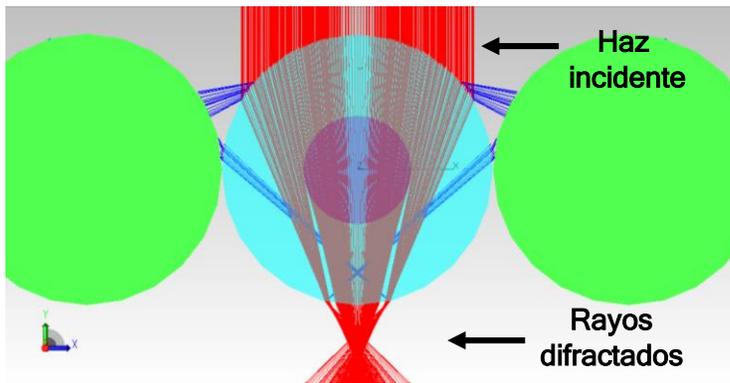
Figura 5.16. Ejecución de la simulación de la muestra 4.



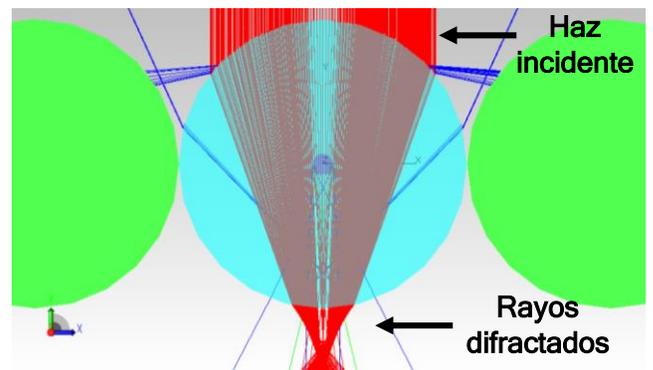
(a)



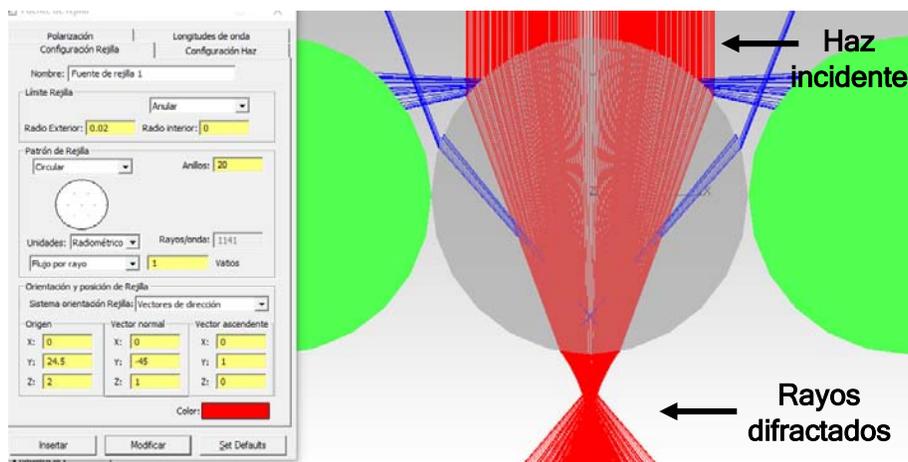
(b)



(c)

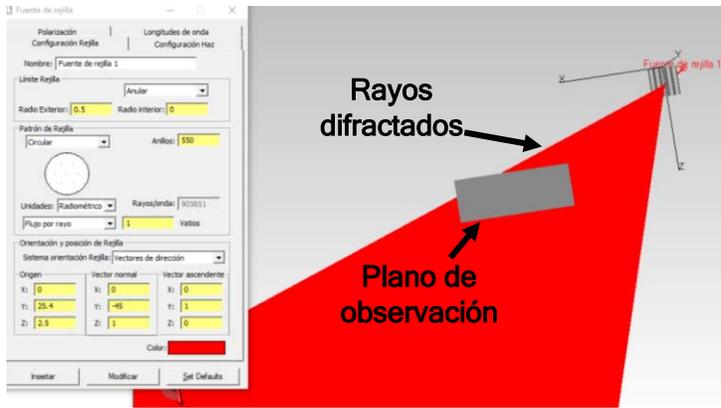


(d)

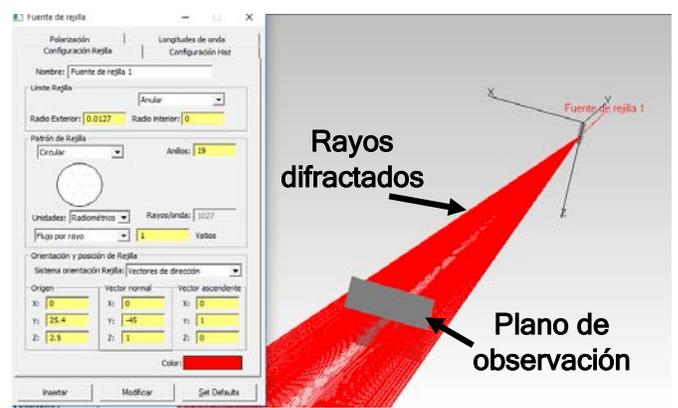


(e)

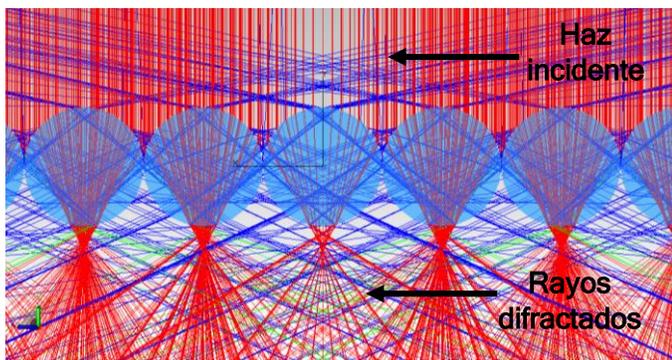
Figura 5.17. Simulaciones haciendo incidir el haz de luz sobre una sola fibra de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5.



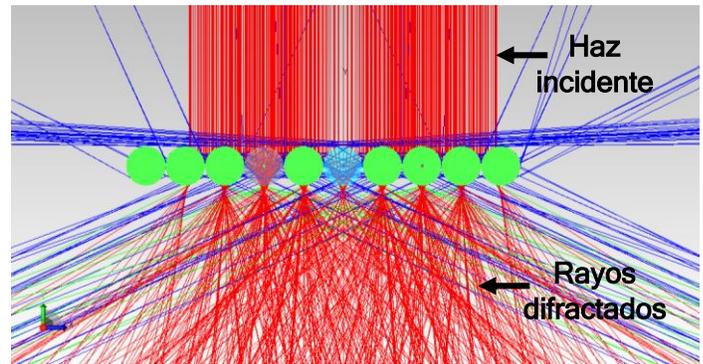
(a)



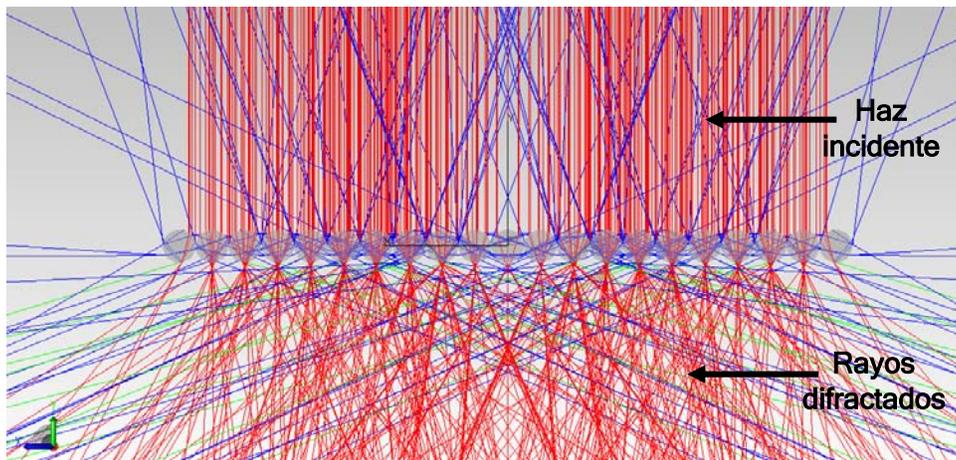
(b)



(c)

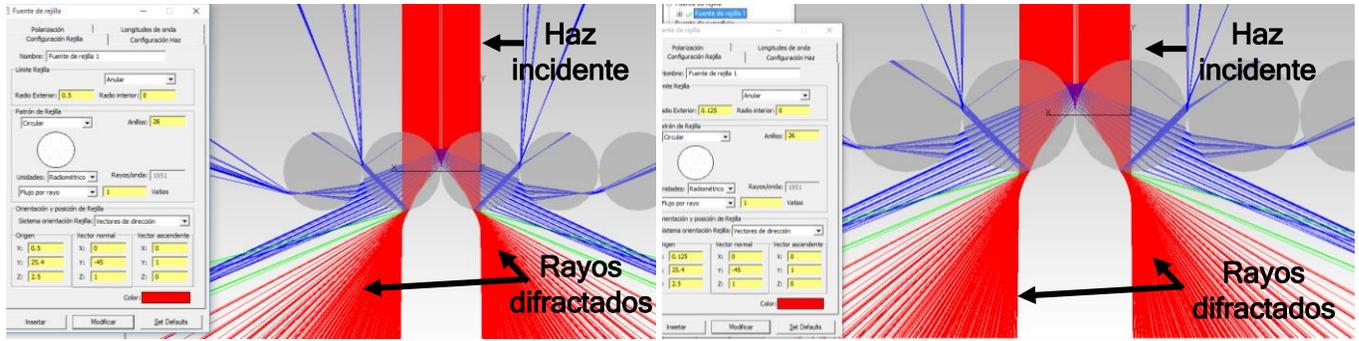


(d)



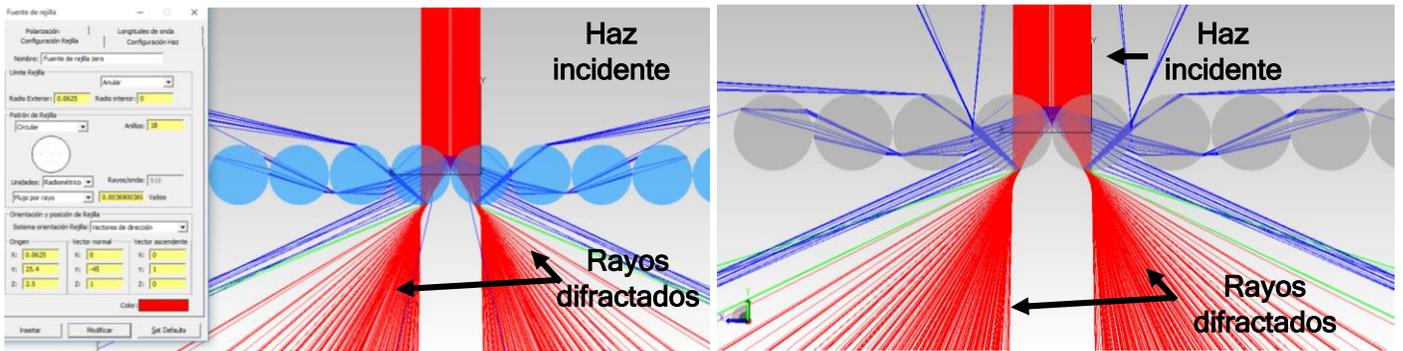
(e)

Figura 5.18. Simulaciones haciendo incidir el haz de luz sobre varias fibras de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5.



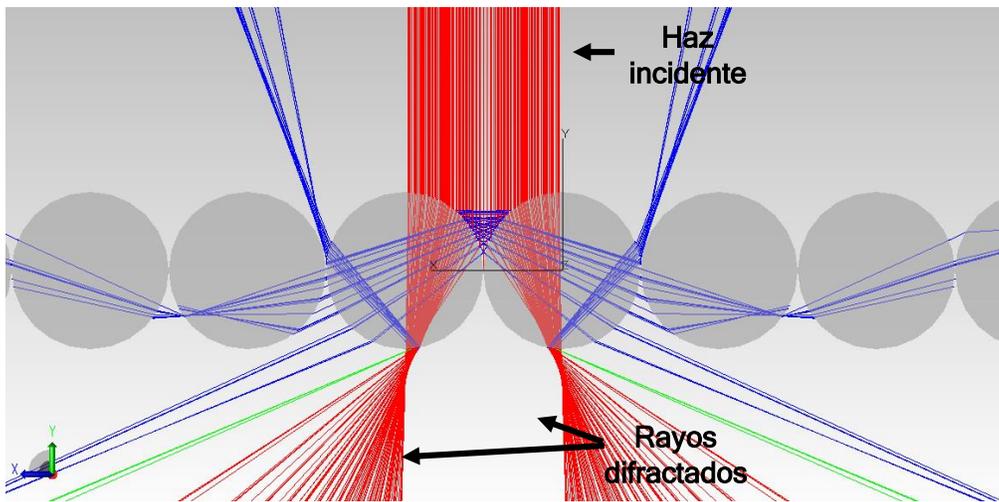
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 5.19. Simulaciones haciendo incidir el haz de luz entre dos fibras de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5.

### 5.3.3 Obtención de las simulaciones

Una vez que se ejecuta la simulación, se pueden evaluar los datos obtenidos por el programa, seleccionando la opción de plano de irradiancia producido en el plano de observación designado para la prueba. En esta misma opción se pueden configurar los gráficos para que muestren un resultado denominado como de color verdadero, el cual muestra la simulación en el espectro visible. De esta forma puede obtenerse la gráfica del patrón de difracción de cada una de las muestras y su aspecto real.

Como última etapa de la obtención de datos simulados, se realiza la solicitud de los valores en forma tabular del plano de irradiancia producido por la simulación. Por medio de esta tabla se pueden conocer las posiciones de los órdenes de difracción irradiados en el plano de observación, teniendo la opción de poder conocer el espaciamiento en milímetros entre el orden cero y el primer orden. En la Figura 5.20 se muestra el aspecto de esta tabla de valores, obtenida para el análisis de la muestra 1. En esta tabla se resalta un valor de la columna titulada X Pos, la cual contiene datos de los puntos máximos de intensidad del plano de irradiancia. En este ejemplo el valor de 0.129909 indica la distancia en milímetros entre el primer orden y el orden cero que se ubica aproximadamente en el centro del plano, donde  $x=0$ .

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos por medio de las simulaciones y se discuten, haciendo además la comparación con datos teóricos y experimentales de cada una de las muestras.

Wavelength	Source	Start Ray	Ray Node	Type	History	Flux	X Pos.	Y Pos.	Z Pos.
0.633	Fuente de rejil...	1	8	SpecTran		0.941553	0	-199.95	7.50049
0.633	Fuente de rejil...	2	8	SpecTran		0.941553	-0.259818	-199.95	7.5005
0.633	Fuente de rejil...	3	8	SpecTran		0.941553	-0.129909	-199.95	7.50135
0.633	Fuente de rejil...	4	8	SpecTran		0.941553	0.129909	-199.95	7.50135
0.633	Fuente de rejil...	5	8	SpecTran		0.941553	0.259818	-199.95	7.5005
0.633	Fuente de rejil...	6	8	SpecTran		0.941553	0.129909	-199.95	7.49964
0.633	Fuente de rejil...	7	8	SpecTran		0.941553	-0.129909	-199.95	7.49964

Figura 5.20. Tabla de datos del plano de irradiancia de la muestra 1.

### 5.4 Conclusiones

En este capítulo se describió el estudio experimental y simulación de las rejillas de difracción de fibra óptica. Primero se describió la experimentación por medio de una instalación real y después se presentó la observación del fenómeno de difracción producido por las rejillas de fibra óptica a través de un ambiente virtual por medio de simulaciones. La instalación real experimental estaba compuesta por una fuente monocromática o de amplio espectro, un lente convergente, un plano de observación y las rejillas de difracción construidas en el capítulo anterior.

Se describieron las tres fuentes utilizadas en el estudio, una con longitud de onda de 633 nm, una de 532 nm y finalmente una fuente de amplio espectro con un rango de 250 nm a 2400 nm. El diámetro del haz que incide en el arreglo de fibras ópticas fue de aproximadamente 1mm al momento de realizar las pruebas preliminares de alineación.

El plano de observación de la instalación experimental se colocó a 200mm o a 1000mm de distancia de la rejilla de difracción dependiendo de la fuente láser con la que se hicieran las

pruebas. Para la fuente de amplio espectro se necesitaba una distancia mayor entre el plano de observación y la rejilla para poder medir de forma más precisa la distancia entre órdenes de difracción. Se realizaron pruebas preliminares para alinear los componentes de la instalación experimental y se documentaron los resultados obtenidos del fenómeno de difracción producido por las rejillas construidas en el capítulo anterior.

En la segunda sección de este capítulo se describió el uso del software llamado TracePro para el análisis de las rejillas de difracción de fibra óptica. En este caso se lograron obtener planos de irradiancia, gráficos del patrón de difracción y distancias entre órdenes producidos al hacer incidir un haz de luz sobre arreglos de fibras ópticas.

Se describió la realización de las simulaciones mediante la interfaz gráfica en tres dimensiones del software, la configuración de las fuentes luminosas utilizadas y la creación del plano de observación. Se realizaron simulaciones para analizar el comportamiento de una fibra óptica cuando un haz de luz incide sobre ella, también se realizaron simulaciones que contemplaban un haz incidente sobre varias fibras a la vez y cuando un haz de luz incide entre dos fibras adyacentes.

Finalmente se obtuvieron planos de irradiancia, gráficos de patrón de intensidad y tablas de valores que indican la distancia entre los órdenes de difracción. En el siguiente capítulo se muestran los datos obtenidos de la etapa experimental de este estudio, incluyendo los resultados de la instalación física y de la virtual. Se compararán los resultados obtenidos con los parámetros teóricos y se discutirá sobre los mismos.

## 5.5 Referencias del capítulo 5

- [1] JDS Uniphase. (2015). [online] Disponible en: <http://www.photonic.solutions.zen.co.uk/downloads/acrobat/jdsu/hene/JUschenelas er.pdf> [Revisado el 8 Noviembre 2015].
- [2] SHIPPING, 3. (2015). *30mw 2 in 1 Green laser pointer/star pointer /Green laser pen/FREE SHIPPING*. [online] Oxlasers.com. Disponible en: [http://www.oxlasers.com/sdp/925334/4/pd-4653056/6198764-2103588/30mw\\_2\\_in\\_1\\_Green\\_laser\\_pointer\\_star\\_pointer\\_Gree.html](http://www.oxlasers.com/sdp/925334/4/pd-4653056/6198764-2103588/30mw_2_in_1_Green_laser_pointer_star_pointer_Gree.html) [Revisado el 8 Noviembre 2015].
- [3] NKT Photonics, (2015). *SuperK COMPACT supercontinuum lasers - NKT Photonics*. [online] Disponible en: <http://www.nktphotonics.com/product/superk-compact-supercontinuum-lasers/> [Revisado el 8 Noviembre 2015].
- [4] Thorlabs.com, (2015). *N-BK7 Bi-Convex Lenses (AR Coating: 650 - 1050 nm)*. [online] Disponible en: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4849&pn=LB1761-B#4859](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4849&pn=LB1761-B#4859) Revisado el 8 Noviembre 2015].
- [5] Lambdare.com, (2015). *Illumination Design Software | Optical Design Software - TracePro*. [online] Disponible en: <http://www.lambdare.com/> [Revisado el 8 Noviembre 2015].

## CAPÍTULO 6

### Resultados y comparación de los estudios teóricos y experimentales

#### 6.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados experimentales y de las simulaciones realizadas, se ilustra el comportamiento del patrón de difracción producido por las rejillas de fibra óptica, mostrando los parámetros más relevantes. Posteriormente se realiza una comparación entre los parámetros experimentales y simulados con los obtenidos de forma teórica, se discute acerca de las similitudes, comportamientos y los factores que influyen directa o indirectamente en el fenómeno de difracción producido por las muestras de rejillas.

#### 6.2 Resultados experimentales

Se obtuvo experimentalmente 'c' (distancia entre el primer orden de difracción y el orden cero, expresada en milímetros) y con este valor se pudo conocer la separación angular, la dispersión angular, Factor P y magnificación anamórfica de las rejillas de difracción experimentales.

Para la fase experimental por medio de una instalación física real, la distancia entre órdenes de difracción se obtuvo de forma preliminar con instrumentos de medición graduados. En este caso se utilizó una regla con resolución de 397 nm. Sin embargo, los resultados se verificaron y ajustaron posteriormente, con el programa de análisis de imágenes llamado ImageJ, introducido en el Capítulo 4, para estimar con mayor precisión las dimensiones y disminuir el error que las mediciones visuales pudieran arrojar. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la experimentación con las rejillas de difracción de fibra óptica utilizando una:

- Fuente láser monocromática de  $\lambda=633$  nm.
- Fuente láser monocromática de  $\lambda=532$  nm.
- Fuente de amplio espectro, considerando el rango de 460 nm a 800 nm.

##### 6.2.1 Fuente láser monocromática de $\lambda=633$ nm

Como primera etapa en la fase experimental, se realizó el estudio de las diferentes rejillas de difracción de fibra óptica con una fuente láser de tipo monocromático que emite a  $\lambda=633$  nm. Utilizando la ec. 5.1 del capítulo anterior, la cual deduce el parámetro de separación angular en función de la distancia entre órdenes de difracción y de la distancia entre el plano de observación y la rejilla de fibra óptica, se pueden conocer los parámetros característicos de las diferentes muestras experimentales, ya que se encuentran en función de la separación angular.

Se emplearon las expresiones del capítulo 3 y las ecs. 4.11, 4.13, 4.15 y 4.17 para calcular los siguientes parámetros: dispersión angular, dispersión lineal, Factor P y magnificación anamórfica, respectivamente.

Los valores resultantes de los parámetros experimentales, al utilizar una fuente láser monocromática de  $\lambda=633$  nm se muestran en la Tabla 6.1. Los patrones de difracción experimentales de la muestra 1 a la 5 se ilustran en la Figura 6.1.

Las muestras 1 y 2 no presentaron patrones de difracción que permitieran cuantificar los parámetros respectivos. Ambos patrones de difracción muestran un máximo de intensidad en el centro, sin embargo en estos casos no se pudieron localizar visualmente los órdenes de difracción y por lo tanto tampoco se pudo conocer la distancia entre el orden cero y el primer orden. Este comportamiento se atribuye en primera instancia a la magnitud de la distancia entre órdenes, la cual, teóricamente es menor a un milímetro. De esta forma los órdenes no muestran claramente sus separaciones al estar divididos por distancias cortas. Se podrían localizar los puntos máximos de irradiancia por medio de un detector, mas no de forma únicamente visual.

En segundo término se encuentran las propiedades y características del material de la fibra óptica (Ver Anexo A). El PMMA en este caso, es un material plástico transparente a las longitudes de onda en el rango visible, aunque presenta un máximo de atenuación entre 600 nm y 650 nm. Es posible que la atenuación no uniforme en la rejilla provoque cambios en la intensidad del patrón de difracción, pero es una hipótesis que todavía merece de un estudio y confirmación.

La imagen del patrón de difracción producido por la muestra 3 no incluye todos los órdenes producidos por la muestra experimental, sino sólo la parte central del patrón de difracción. En esta imagen se puede apreciar de forma visual un patrón reconocible espaciado de manera uniforme y se puede decir que la intensidad de los diferentes órdenes también es uniforme. El patrón de difracción producido por la muestra 4 incluye la parte central del patrón de difracción. En este caso tanto la intensidad como el espaciamiento entre órdenes resultan uniformes. Si se compara se puede notar que el espaciamiento entre los órdenes es ligeramente mayor al patrón de la muestra 3, aunque su forma y aspecto en general es muy similar.

Finalmente, también en la Figura 6.1 se puede observar el patrón de difracción producido por la muestra 5. El aspecto es similar al de las muestras 3 y 4 en cuanto a uniformidad de la intensidad y espaciamiento, sin embargo se puede notar que los órdenes se encuentran separados por una distancia mayor.

**Tabla 6.1 Parámetros experimentales obtenidos con  $\lambda=633$  nm y  $m=1$ .**

Muestra	c [mm]	$\beta$ [°]	D $\left[\frac{\mu rad}{nm}\right]$	Factor P $\left[\frac{nm}{mm}\right]$	Magnificación Anamórfica
1	NA	NA	-	-	-
2	NA	NA	-	-	-
3	1.03	0.2951	8.13	614.49	0.999987
4	1.05	0.3008	8.29	602.85	0.999986
5	2.4	0.6875	18.95	263.74	0.999928

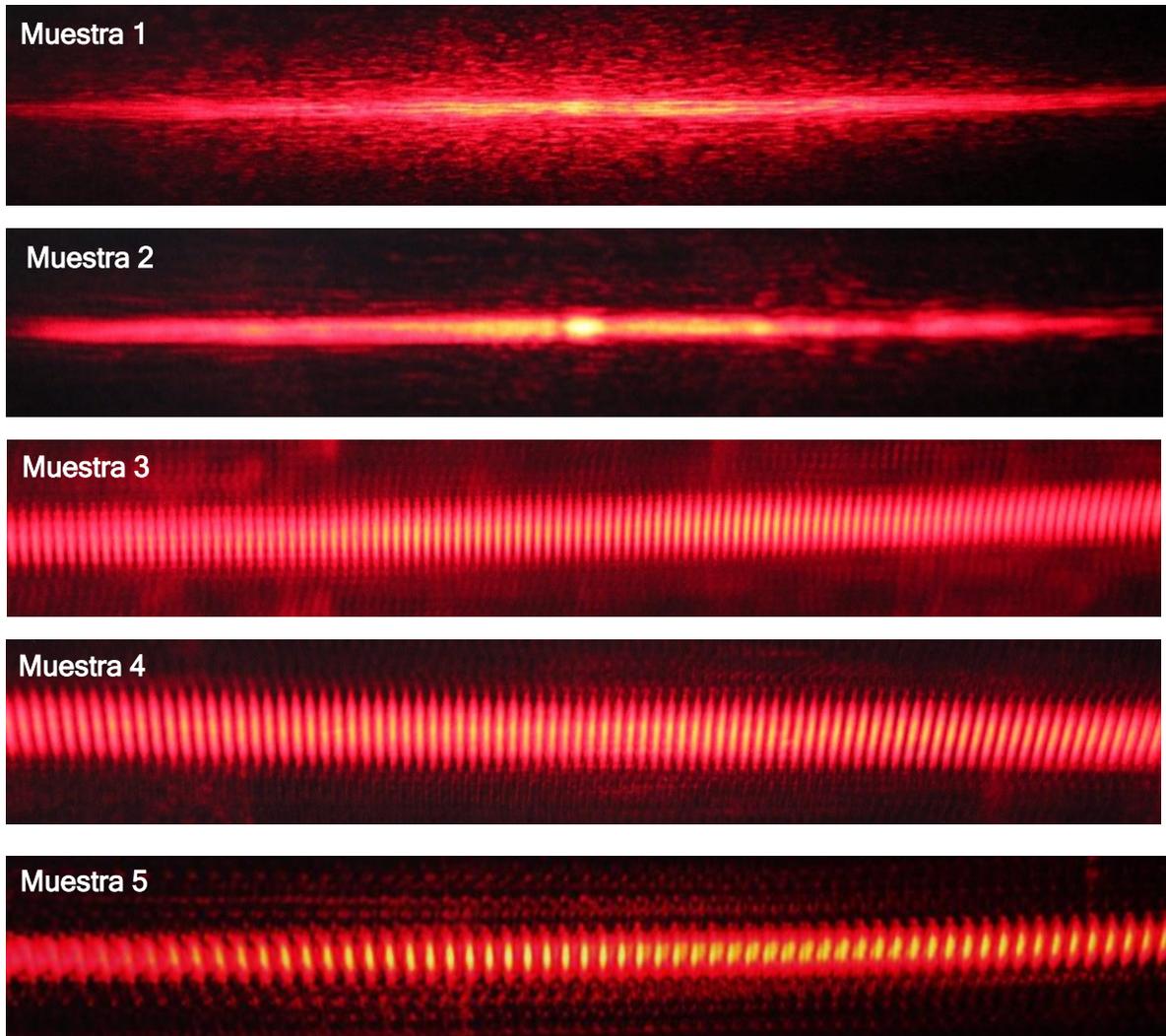


Figura 6.1 Patrones de difracción producidos por las muestras a  $\lambda=633$  nm.

En la Figura 6.2 se muestran las vistas con mayor resolución de los patrones de difracción producidos por las cinco muestras. En estas imágenes se ilustró el proceso de medición de la distancia entre órdenes de difracción de las muestras 3,4 y 5, la cual se consideró entre el centro de un orden y otro. Además se indicó el orden cero de los patrones de difracción de las muestras 1 y 2. La toma de datos a lo largo de la fase experimental se evaluó en varias partes del patrón de difracción, para corroborar que las distancias entre órdenes fueran precisas.

En el caso de las muestras 1 y 2, se observa un patrón disperso de forma horizontal, cuya irradiancia máxima se encuentra al centro del mismo y disminuye en los extremos, presentando cierto grado de simetría a partir del punto central. Ambas muestras están hechas con arreglos de fibra óptica plástica de distintos tamaños. Al disminuir el diámetro de las fibras ópticas plásticas en la rejilla, el patrón de difracción se vuelve más estrecho y definido, pudiéndose decir que si se disminuye el diámetro de las fibras, el patrón producido resultaría más delgado y los órdenes de difracción serían reconocibles visualmente.

Por otro lado, en los patrones de difracción producidos por las muestras 3, 4 y 5 si se pueden diferenciar los órdenes ya que cada uno presenta un máximo de irradiancia y están

separados por distancias cortas, sin embargo entre cada uno de los máximos se observa luz de menor intensidad. Es decir, la irradiancia encuentra sus máximos en cada orden de difracción y disminuye gradualmente al alejarse del centro de los diferentes órdenes. Se observó que la distancia entre órdenes es mayor conforme disminuye el diámetro de las fibras ópticas utilizadas, pudiendo decirse además, que si las fibras fueran cada vez más delgadas, la irradiancia entre órdenes sería considerablemente menor puesto que estarían más alejados unos de otros.

Materiales como el sílice y el borosilicato cuentan con valores muy altos de transmisión en el espectro visible (Ver Anexo A). Los comportamientos de atenuación y trasmisión son de gran utilidad para este estudio, pues nos indica la medida en que el material de las fibras permite el paso de la luz, sin embargo al utilizar las fibras ópticas de forma transversal, es aún más recomendable tener en cuenta el cambio de trayectoria e intensidad que experimenta la luz al incidir sobre medios con distintas características, como la geometría y el índice de refracción en particular.

Un ejemplo claro para considerar estas características es el resultado que arrojaron las muestras 3 y 4, hechas con arreglos de fibras MMF y SMF respectivamente. Estas fibras tienen diámetros totales de la misma magnitud, pero sus núcleos son diferentes. Los patrones de difracción producidos por ambas muestras son similares en aspecto, pero el espaciamiento entre órdenes es ligeramente mayor en el caso del arreglo de fibras SMF. Esto puede deberse al cambio de trayectoria que sufre la luz al pasar por materiales con diversos índices de refracción y geometría, factores que la expresión general para rejillas de difracción no toma en cuenta.

Si se considera el índice de refracción, se debe tomar en cuenta que la luz al pasar de un medio a otro cambia su velocidad de fase, la tasa a la cual la fase de la misma se propaga en el espacio y cambia también el ángulo en el que se refracta. Además se debe considerar el fenómeno de reflexión que pudiera existir en el caso de las fibras hechas con dos tipos de materiales, factor que no influiría en el caso de las fibras ultradelgadas utilizadas, ya que cuentan con núcleo único hecho de un solo material.

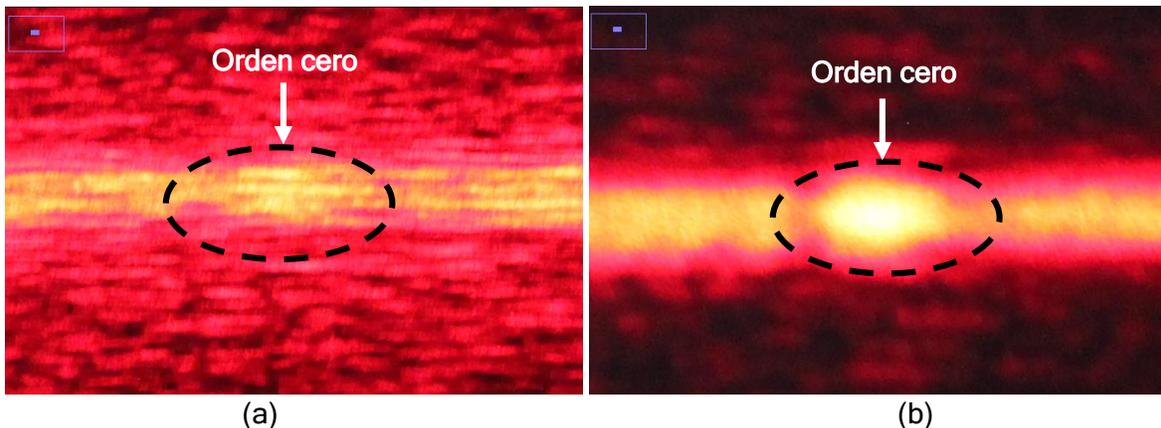


Figura 6.2. Patrones de difracción a  $\lambda=633$  nm de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5.

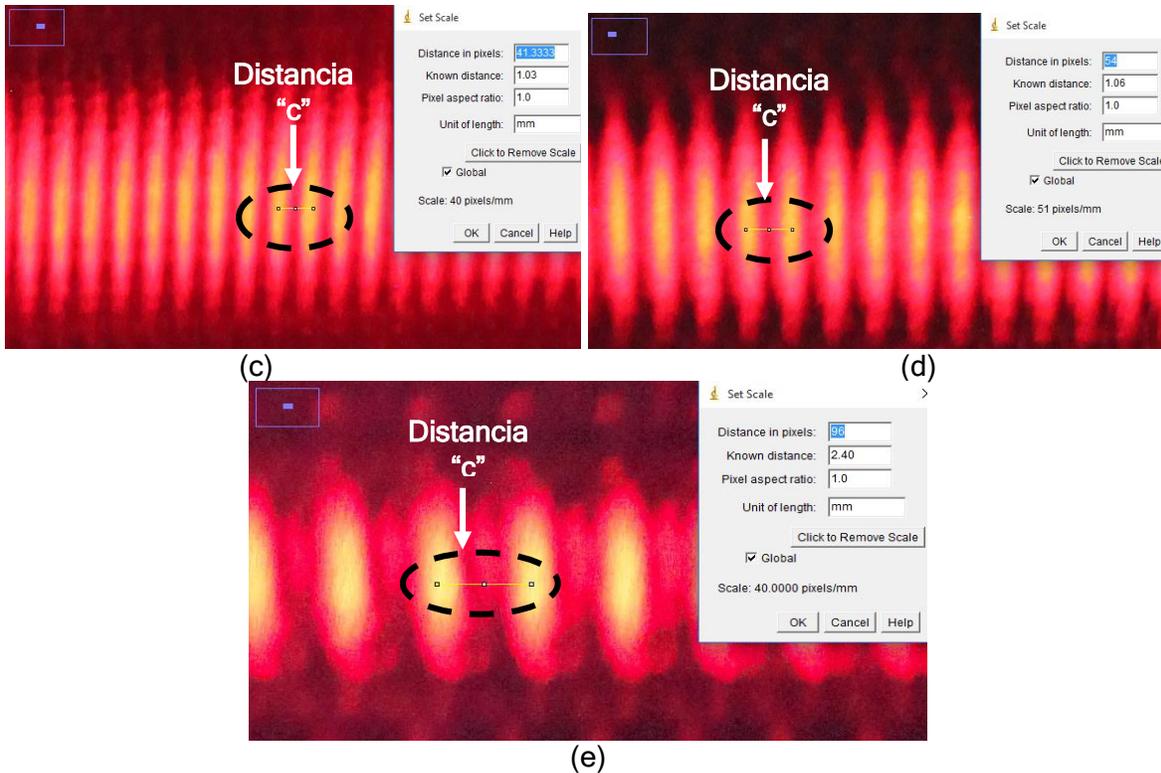


Figura 6.2. Patrones de difracción a  $\lambda=633$  nm de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5 (continuación).

## 6.2.2 Fuente láser monocromática de $\lambda=532$ nm

La segunda etapa de la fase experimental, se realizó con una fuente láser de tipo monocromático que emite a  $\lambda=532$  nm. En esta etapa se obtuvieron los parámetros experimentales de las rejillas de difracción de fibra óptica a partir de la separación angular. Los resultados obtenidos se concentran en la Tabla 6.2 y los patrones de difracción de la muestra 1 a la 5 se ilustran en la Figura 6.3.

En el caso de la muestra 1 no se pueden diferenciar los diversos órdenes. En este caso además, es menos reconocible el orden cero, que se ubicaría en la parte central del patrón. Sin embargo, la forma obtenida es muy similar al de la muestra 1 en la experimentación con fuente monocromática de 633 nm. En el patrón producido por la muestra 2 se puede diferenciar una concentración de irradiancia en el centro, que se puede denominar como orden cero y se pueden apreciar unas franjas delgadas a lo largo del patrón, que fueron identificadas como órdenes de difracción, los cuales están separados de manera uniforme por distancias determinadas.

Los patrones de difracción de la muestra 3 y 4 son similares entre sí y los órdenes muy brillantes, debido a la intensidad de la fuente láser. Los órdenes presentan intensidades uniformes a lo largo del patrón. Al analizar las imágenes, se obtuvo un espaciamiento entre órdenes ligeramente mayor para el caso de la muestra 4. Finalmente en el patrón de difracción producido por la muestra 5, se pueden apreciar los diversos máximos de intensidad espaciados de manera uniforme, aunque se pierde un poco la simetría, ya que una parte del patrón de difracción se obtuvo de forma menos nítida.

El comportamiento de las muestras con esta nueva fuente monocromática es similar al obtenido en el caso anterior. Sin embargo, los patrones de difracción obtenidos presentan una mayor saturación, ya que la fuente utilizada es muy brillante. Se puede observar que la distancia entre órdenes aumenta al utilizar muestras con fibras ópticas más delgadas. Los patrones de difracción de las muestras 3 y 4 resultaron similares, aunque prevalece una mayor separación angular para el caso de la muestra 4. En el caso de la muestra 5, se obtuvo un patrón con poca simetría, causado probablemente por el factor de alineación del arreglo de fibras que produce un efecto de poca nitidez en el fenómeno de difracción.

Las distancias obtenidas entre órdenes son menores a las obtenidas con la fuente de 633 nm, ya que los órdenes aparecen de forma más continua al utilizar longitudes de onda menores y se obtienen distanciamientos más grandes entre los órdenes con longitudes de onda mayores. La Figura 6.4 muestra las vistas ampliadas de los patrones de difracción producidos por las rejillas experimentales.

Tabla 6.2 Parámetros experimentales obtenidos con  $\lambda=532$  nm y  $m=1$ .

Muestra	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
1	NA	NA	-	-	-
2	0.41	0.1175	3.85	1297.07	0.999998
3	0.76	0.2177	7.14	700.07	0.999993
4	0.77	0.2206	7.23	690.87	0.999993
5	2.19	0.6274	20.58	242.91	0.999940

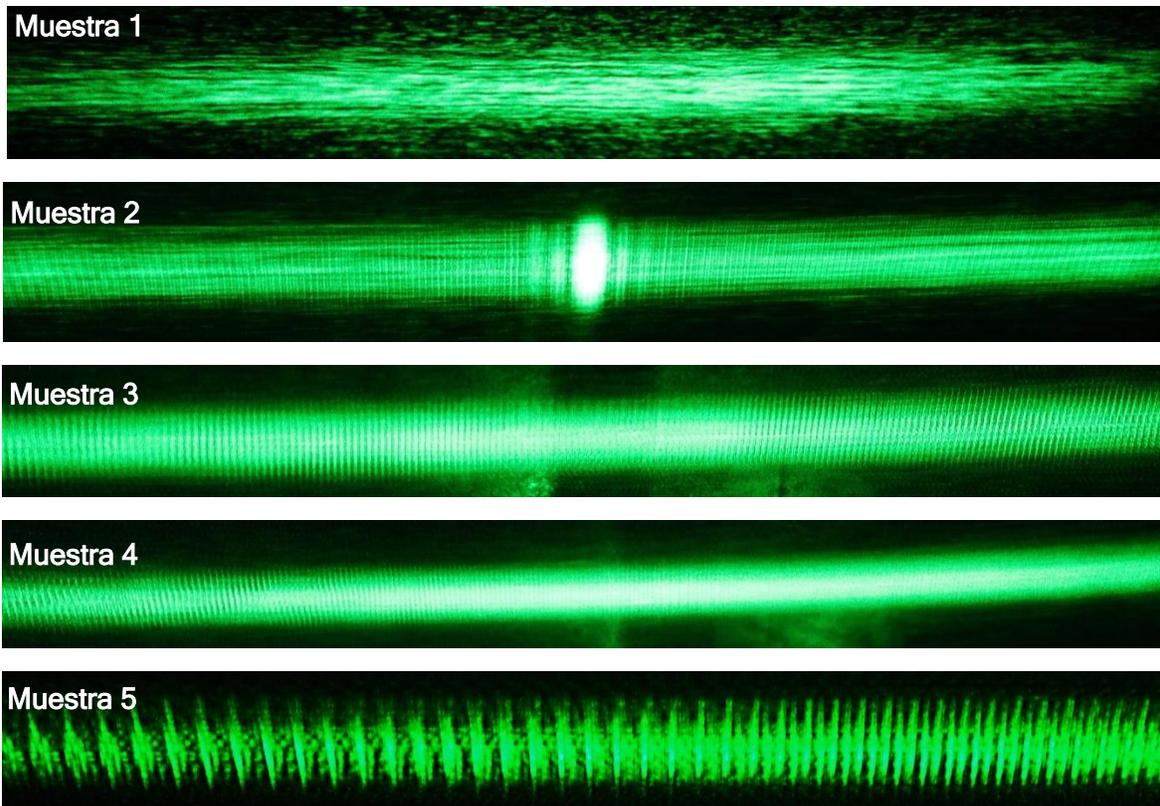


Figura 6.3 Patrones de difracción producidos por las muestras a  $\lambda=532$  nm.

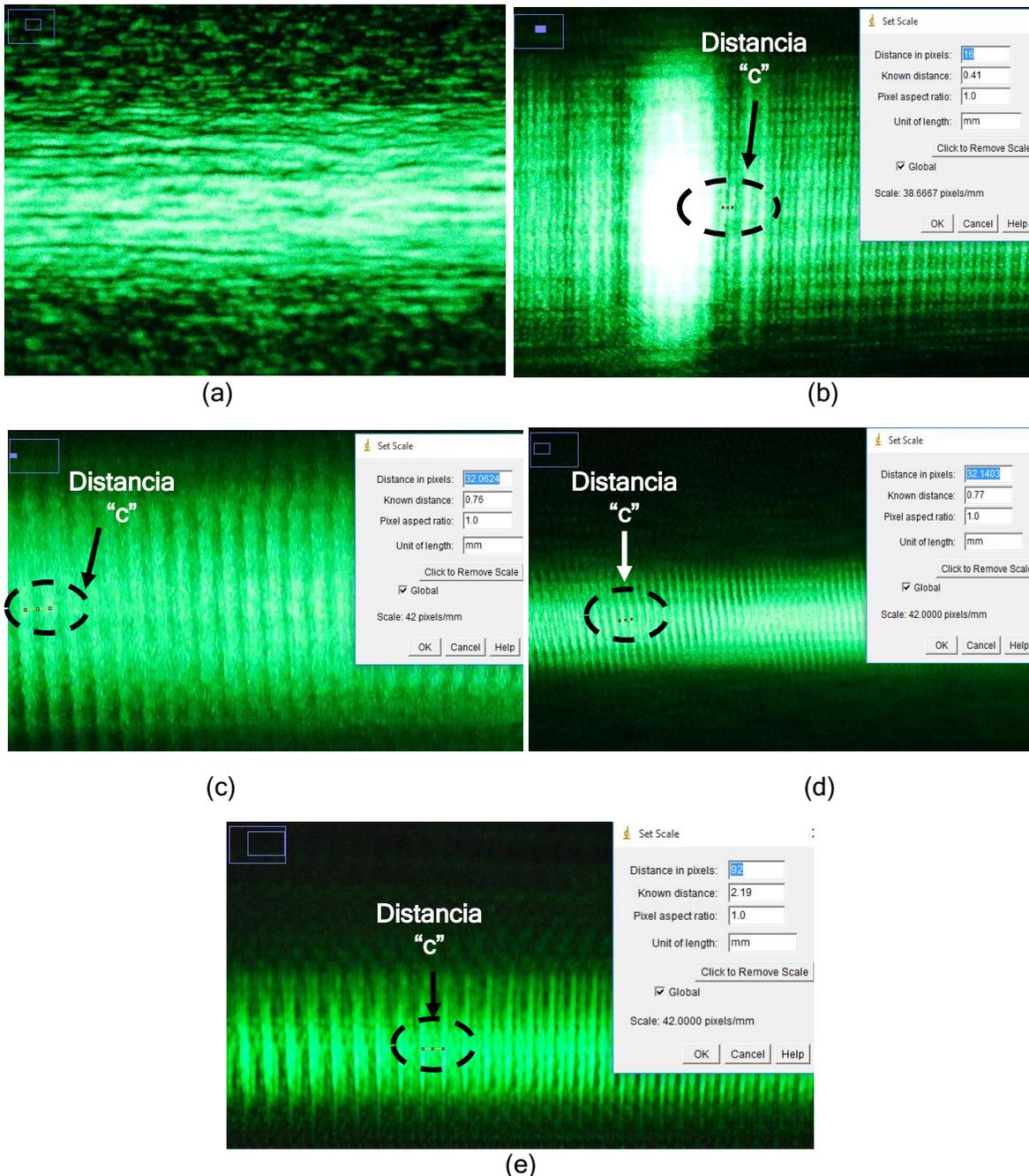


Figura 6.4 Patrones de difracción a  $\lambda=532$  nm de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5 (vista ampliada).

### 6.2.3 Fuente de amplio espectro

La última etapa de la parte experimental incluye una fuente de amplio espectro y para efectos de la presente tesis, se delimita el estudio al rango visible, abarcando desde los 460 nm hasta los 800 nm aproximadamente. En este estudio no se utilizaron elementos de detección, por lo que los valores obtenidos de longitud de onda son aproximados y se utilizan sólo como referencia para indicar la separación angular que presentan las diversas franjas del espectro visible.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.3, que contiene los parámetros de las muestras 3, 4 y 5. Se omitieron los datos de las muestras 1 y 2 en las tablas, ya que no presentaron un patrón de difracción cuyos elementos espectrales pudieran diferenciarse visualmente. Los fenómenos producidos por las muestras 1 a la 5 se ilustran en la Figura 6.5.

En el caso de la muestra 1, se puede apreciar un patrón de difracción difuso de forma horizontal y la irradiancia se concentra en el centro del mismo. En el caso de la muestra 2, el patrón se muestra de forma más nítida, aunque presenta el mismo comportamiento en donde se concentra la intensidad en el centro. En el caso de la muestra 3 se puede apreciar al orden cero en el centro del patrón de difracción, siendo más brillante y de color blanco. A los lados del orden cero se encuentran los órdenes de difracción y cada orden posee diversas franjas de colores dentro del espectro visible. Las longitudes de onda menores se encuentran más cercanas al orden cero y las longitudes de onda mayores tienden a alejarse. Los órdenes se dispersan de forma horizontal y a medida que se alejan del centro tienen intensidades menores.

En la imagen del patrón de difracción de la muestra 4, se puede localizar el orden cero en el centro del patrón, el cual es brillante y de color blanco. La terminación del sistema láser es divergente y es por esto que el orden cero se expande. Al comparar el fenómeno de difracción de las muestras 3 y 4, se observa gran similitud, sin embargo puede notarse un distanciamiento entre órdenes ligeramente mayor en el caso de la muestra 4.

Finalmente en el patrón de difracción producido por la muestra 5 se puede diferenciar al orden cero en el centro y los órdenes a los lados, que contienen las diversas franjas de color dentro del espectro visible. Claramente se ve que las distancias entre órdenes son mayores a las obtenidas por las muestras 3 y 4, sin embargo el fenómeno de difracción no es tan nítido como en esos casos.

En la Figura 6.6 se encuentran las vistas ampliadas de todos los patrones de difracción experimentales utilizando una fuente de amplio espectro. Se colocaron marcadores que indican el orden cero en el caso de las muestras 1 y 2, y también en el ejemplo de medición de las distancias existentes entre el centro del orden cero y el final de la franja de color rojo de las muestras 3, 4 y 5.

Se obtuvieron resultados similares al de las fuentes monocromáticas al no haber obtenido órdenes de difracción diferenciables visualmente en el caso de las muestras hechas con fibra óptica plástica. También se consiguieron resultados muy similares entre el fenómeno originado por las muestras hechas de fibras ópticas multimodo y monomodo, logrando separaciones angulares mayores para este último tipo de fibra. Las mayores separaciones angulares se consiguieron con la muestra 5, sin embargo los órdenes no fueron tan nítidos. Se comprobó además que a mayor longitud de onda se obtienen mayores separaciones angulares entre órdenes de difracción y sobre todo, se comprobó la posibilidad de separar los diversos componentes espectrales en el rango visible de una fuente de amplio espectro.

Es importante mencionar que la fuente de amplio espectro utilizado emite longitudes de onda en el rango de 450 nm a 2400 nm, por lo que también se estarían difractando las longitudes de onda pertenecientes al infrarrojo cercano a partir de 800 nm. La comprobación de este principio dentro del rango infrarrojo puede lograrse por medio de elementos de detección, ya que visualmente esto no es factible. Para extender el estudio experimental a

la banda infrarroja hasta las ondas más largas de SC, se requiere de los detectores de la radiación de la banda infrarroja y las fibras ópticas y lentes de materiales transparentes hasta la longitud de onda de 2.4  $\mu\text{m}$ . Algunos de estos materiales ópticos [1-3] utilizados para la banda visible e infrarroja son el BK7, sílice, Fluoruro de Calcio o fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), Fluoruro de Magnesio ( $\text{MgF}_2$ ), Cristal de cuarzo, Seleniuro de Zinc ( $\text{ZnSe}$ ), Fluoruro de Bario ( $\text{BaF}_2$ ), Fluoruro de Litio ( $\text{LiF}$ ), Zafiro ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Germanio ( $\text{Ge}$ ), Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Arseniuro de Galio ( $\text{GaAs}$ ), entre otros.

Tabla 6.3 Parámetros experimentales de las muestras, obtenidos con fuente de amplio espectro y  $m=1$ .

$\lambda$ [ nm ]	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu\text{rad}}{\text{nm}}$ ]	Factor P [ $\frac{\text{nm}}{\text{mm}}$ ]	Magnificación Anamórfica
<b>Muestra 3</b>					
460	3.48	0.1994	7.57	132.18	0.999994
475	3.71	0.2126	7.81	128.03	0.999993
490	3.86	0.2212	7.88	126.94	0.999993
520	4.19	0.2401	8.06	124.10	0.999991
550	4.33	0.2481	7.87	127.02	0.999991
570	4.52	0.2590	7.93	126.10	0.999990
590	4.67	0.2676	7.92	126.22	0.999989
615	4.98	0.2853	8.10	123.49	0.999988
640	5.07	0.2905	7.92	126.11	0.999987
720	5.52	0.3163	7.67	130.43	0.999985
800	6.02	0.3449	7.53	132,89	0.999982
<b>Muestra 4</b>					
460	3.89	0.2229	8.46	118.25	0.999992
475	4.14	0.2372	8.72	114.73	0.999991
490	4.31	0.2469	8.80	113.69	0.999991
520	4.56	0.2613	8.77	114.03	0.999990
550	4.93	0.2825	8.96	111.56	0.999988
570	5.13	0.2939	9.00	111.11	0.999987
590	5.43	0.3111	9.20	108.65	0.999985
615	5.56	0.3186	9.04	110.61	0.999985
640	5.90	0.3380	9.22	108.47	0.999983
720	6.48	0.3713	9.00	111.11	0.999979
800	7.24	0.4148	9.05	110.49	0.999974
<b>Muestra 5</b>					
460	8.75	0.5013	19.02	52.57	0.999962
475	9.92	0.5684	20.88	47.88	0.999951
490	10.19	0.5838	20.79	48.08	0.999948
520	10.69	0.6125	20.56	48.64	0.999943
550	11.44	0.6554	20.80	48.07	0.999935
570	12.00	0.6875	21.05	47.50	0.999928
590	12.58	0.7207	21.32	46.90	0.999921
615	13.05	0.7477	21.22	47.12	0.999915
640	13.55	0.7763	21.17	47.23	0.999908
720	15.05	0.8622	20.90	47.84	0.999887
800	16.76	0.9602	20.95	47.73	0.999860

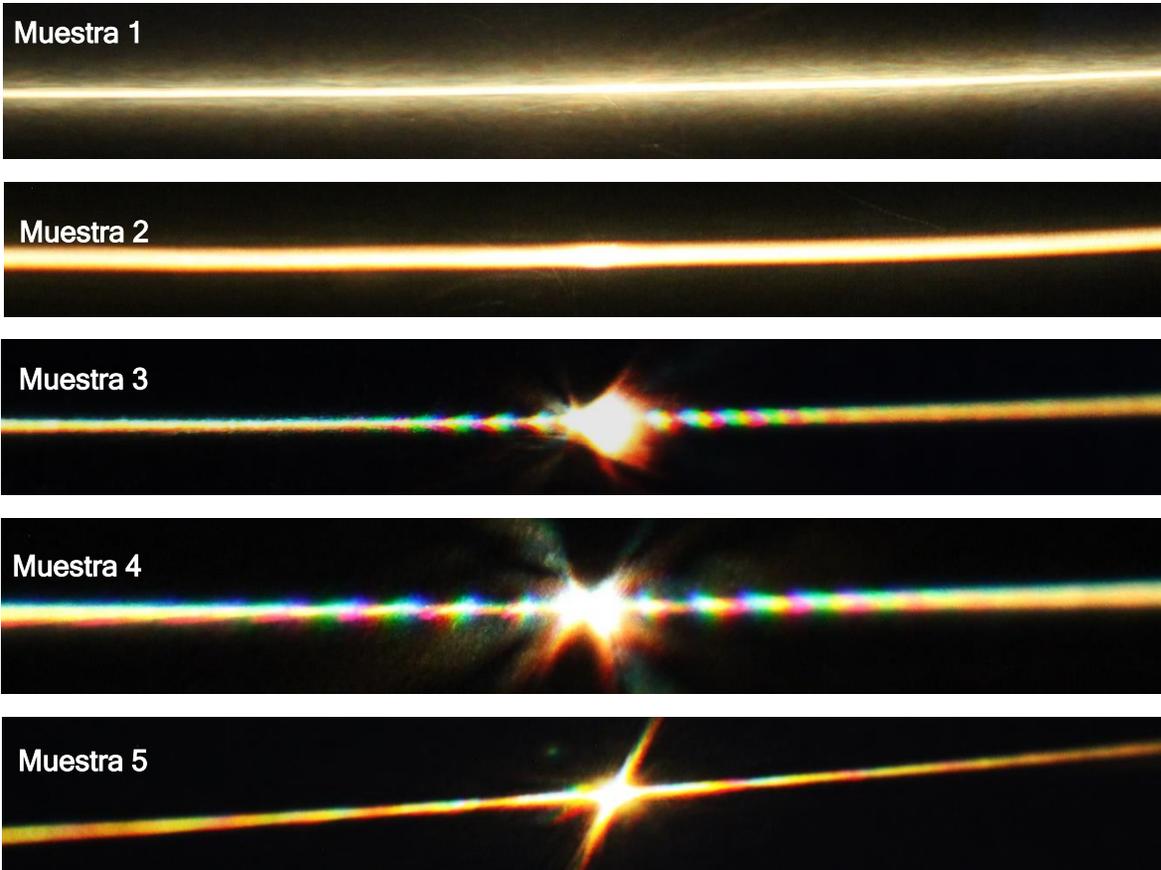


Figura 6.5 Patrones de difracción producidos por las muestras con la fuente de amplio espectro.

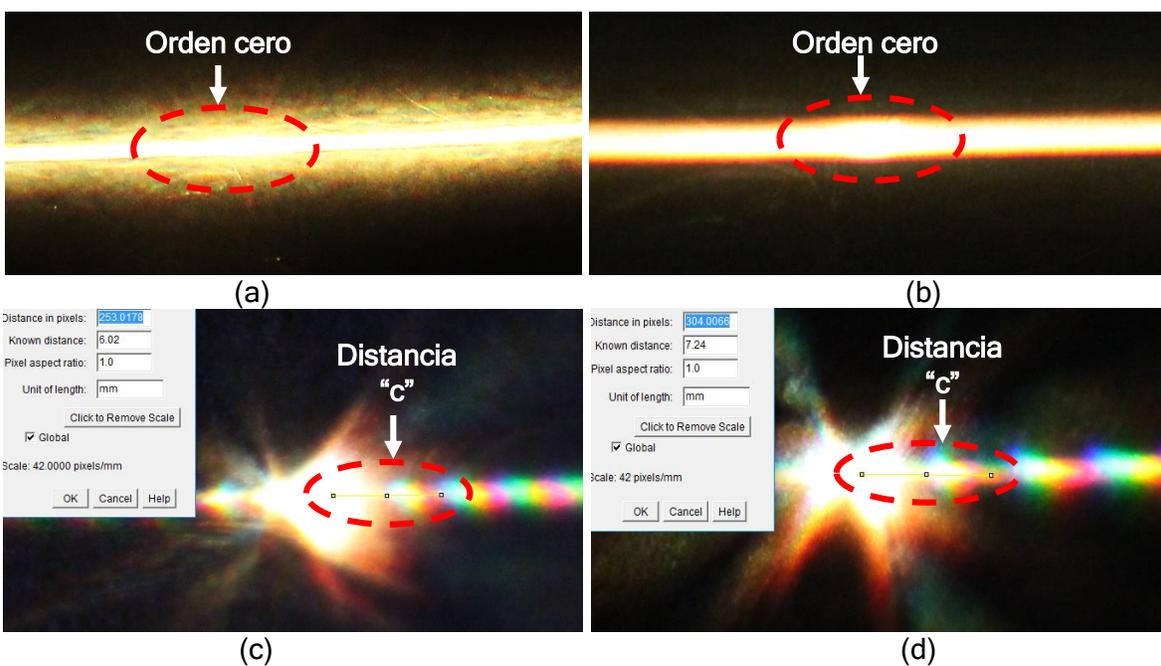
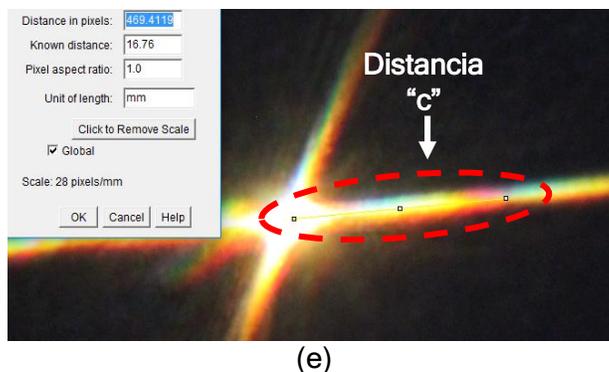


Figura 6.6 Patrones de difracción con una fuente de amplio espectro de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5.



(e)  
 Figura 6.6 Patrones de difracción con una fuente de amplio espectro de la (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 y (e) muestra 5 (continuación).

### 6.3 Resultados de la simulación

En esta segunda sección se presentan los resultados arrojados por el simulador TracePro. Este simulador fue utilizado para obtener gráficos de irradiancia, patrones de difracción y separación angular entre órdenes. La separación angular se calculó para cada muestra a partir de la distancia existente entre dos órdenes de difracción adyacentes. A partir de los valores de separación angular se obtuvieron los parámetros de dispersión angular, Factor P y magnificación anamórfica. A continuación se presentan los resultados obtenidos de las rejillas de difracción de fibra óptica utilizando el software para simulación con los siguientes elementos:

- Fuente láser de  $\lambda=633$  nm.
- Fuente láser de  $\lambda=532$  nm.
- Fuente de amplio espectro, considerando el rango de 460 nm a 800 nm.

#### 6.3.1 Fuente láser de $\lambda=633$ nm

Las primeras simulaciones con TracePro se llevaron a cabo con una fuente luminosa monocromática de 633 nm. Por medio de la interfaz del software se adquirieron las distancias entre órdenes de difracción "c". En la Tabla 6.6 se encuentran los parámetros obtenidos de la simulación para las 5 muestras creadas virtualmente.

En la Figura 6.7 se muestra el patrón de difracción producido por la muestra 1, también se incluye el plano de irradiancia y su "aspecto realista", función extra que el programa ofrece. Se puede observar un patrón cuyo máximo se concentra en el centro y la intensidad disminuye al alejarse de este punto. Existen otros máximos de intensidad, pero en general no se logran diferenciar los órdenes de difracción. Esto mismo sucede en la Figura 6.8, la cual proporciona los resultados de la muestra 2. La forma del patrón de difracción es similar al caso de la muestra 1, sin embargo la longitud es más amplia.

Los datos obtenidos de la simulación con la muestra 3 se encuentran en la Figura 6.9. En esta imagen se puede observar un patrón de difracción con franjas uniformes. Entre cada orden de difracción existe intensidad luminosa, ya que los mínimos del patrón no llegan hasta un valor nulo. Por otro lado la Figura 6.10 ilustra el resultado que arrojó la muestra 4. En este caso el patrón no es uniforme en cuanto a intensidad de las franjas pero si en el espaciamiento entre órdenes. Existe un orden central y a medida que los órdenes incrementan hacia los lados, la intensidad luminosa desciende. En la Figura 6.10 se puede

apreciar también que los mínimos no llegan a un valor nulo. Finalmente la Figura 6.11 ilustra el resultado de la muestra 5. Se puede apreciar en estas un patrón de difracción uniforme en espaciamiento e intensidad de los órdenes.

Algunos de los cambios más notables al pasar de un arreglo de fibras gruesas a un arreglo de fibras más delgadas, es el ensanchamiento del patrón de difracción y la concentración de la irradiancia en un área menor al centro del mismo. Las intensidades de los órdenes que forman al patrón de difracción de la muestra 3 resultaron ser uniformes, al igual que la distancia entre los mismos. Los órdenes más altos del patrón de la muestra 4, por otro lado, disminuían en intensidad aunque las distancias entre estos permanecieron uniformes.

Finalmente los resultados de la muestra 5 se diferenciaron por el mayor espaciamiento entre órdenes de difracción. Además el patrón de difracción correspondiente presentaba mínimos de intensidad que disminuían hasta un valor igual a cero, dando como resultado irradiancia nula entre órdenes. Se conserva una tendencia de aumento en la separación angular al utilizar muestras con fibras ópticas más delgadas. Y en el caso de las muestras cuyo diámetro externo es el mismo, prevalece un espaciamiento mayor entre los órdenes procedentes del arreglo de fibras monomodo que entre los órdenes del arreglo de fibras multimodo.

Tabla 6.6 Parámetros obtenidos en simulador con  $\lambda=633$  nm y  $m=1$ .

Muestra	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
1	0.1299	0.0372	1.03	4872.64	1.000000
2	0.5019	0.1438	3.96	1261.20	0.999997
3	1.0033	0.2874	7.92	630.92	0.999987
4	1.0620	0.3042	8.39	596.03	0.999986
5	2.5109	0.7193	19.83	252.08	0.999921

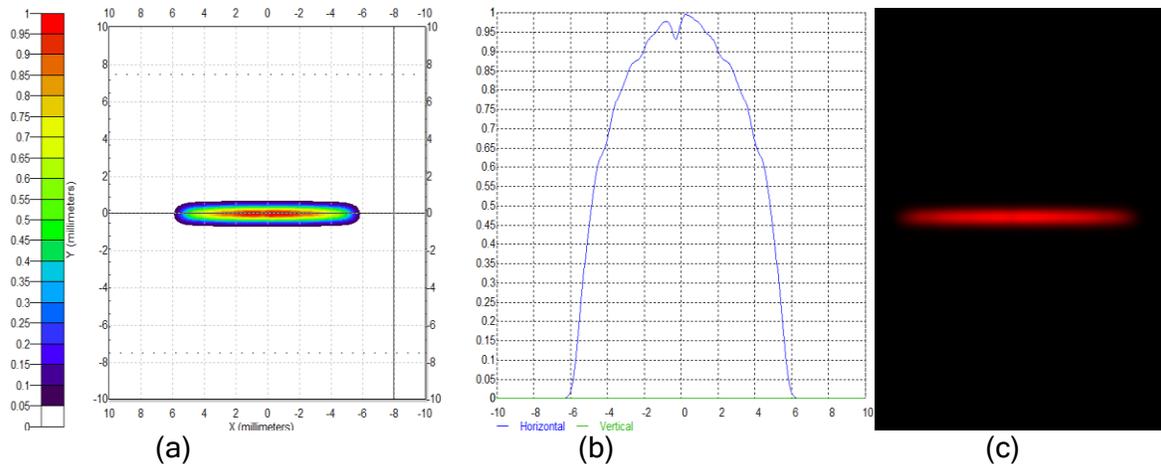


Figura 6.7. Resultados de la simulación con 633 nm de la muestra 1: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

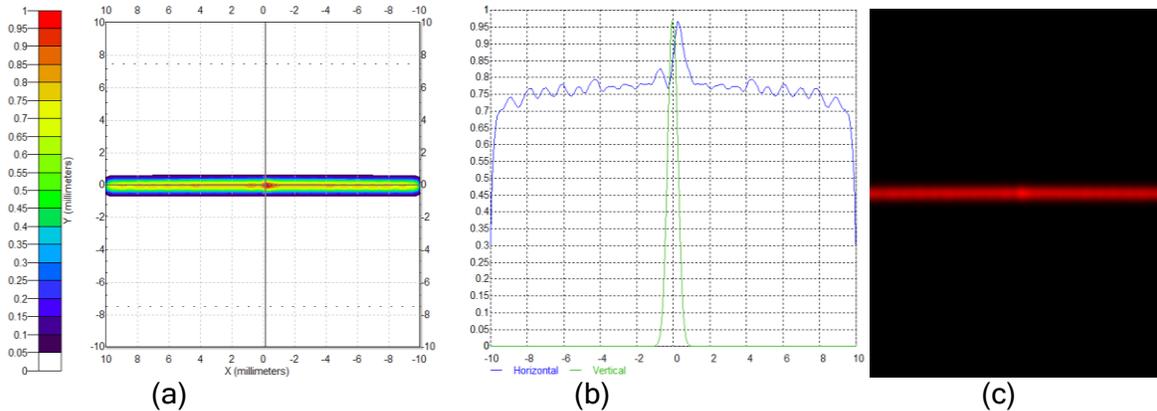


Figura 6.8. Resultados de la simulación con 633 nm de la muestra 2: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

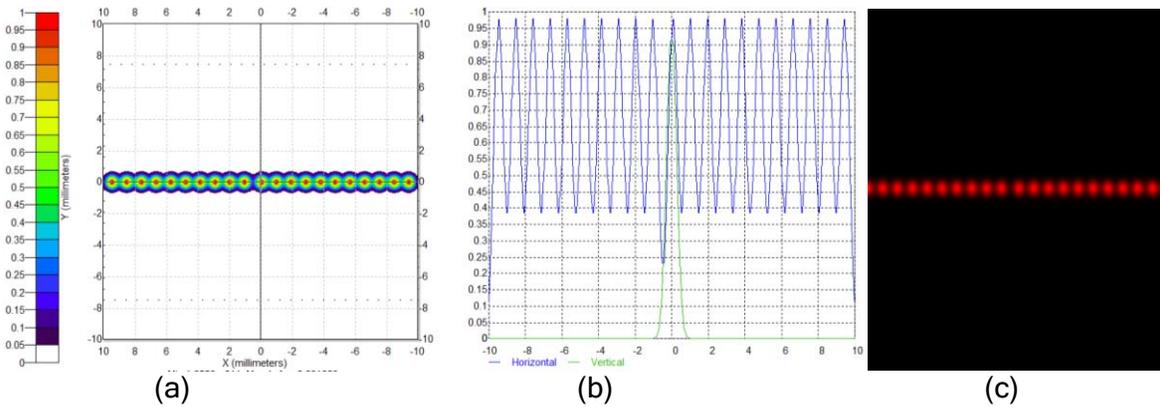


Figura 6.9. Resultados de la simulación con 633 nm de la muestra 3: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

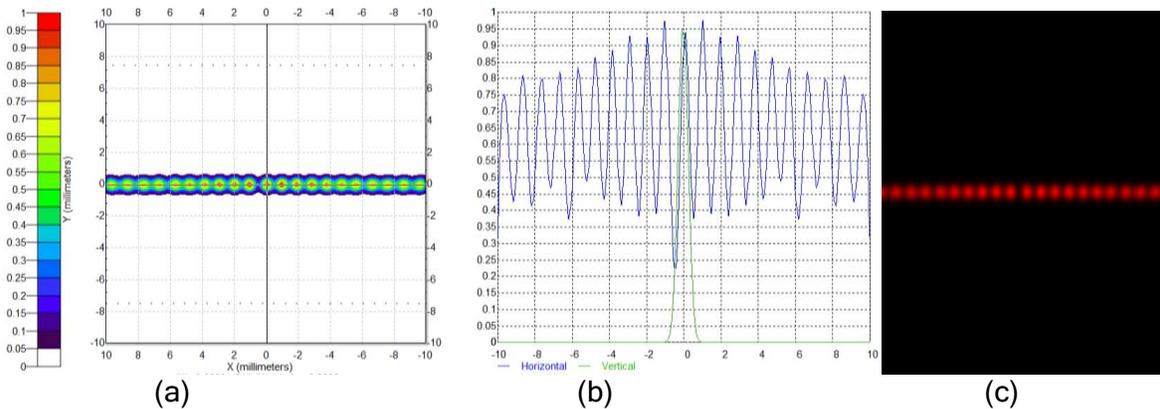


Figura 6.10. Resultados de la simulación con 633 nm de la muestra 4: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

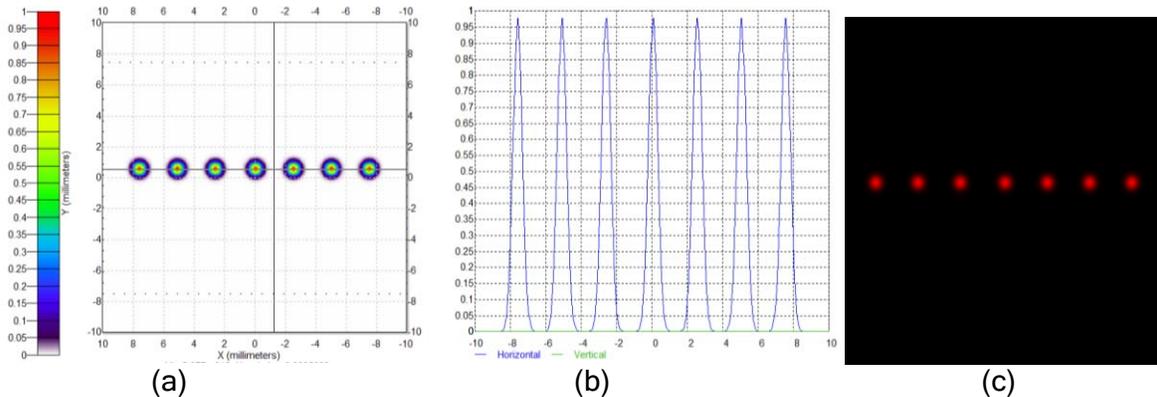


Figura 6.11. Resultados de la simulación con 633 nm de la muestra 5: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

### 6.3.2 Fuente láser de $\lambda=532$ nm

La siguiente etapa en la simulación virtual de los prototipos de rejillas de difracción se realizó integrando una fuente monocromática que emite a 532 nm. El software arrojó los valores de distanciamiento entre órdenes y a partir de estos se logró calcular los parámetros de cada una de los 5 prototipos de fibra óptica. Los resultados obtenidos en esta fase se encuentran concentrados en la Tabla 6.7. Se obtuvieron además los planos de irradiancia y los gráficos del patrón de difracción que presentaron cada una de las muestras. Las Figuras 6.12 a 6.16 ilustran los resultados de las muestras 1 a 5 respectivamente.

En el caso de las muestras 1 y 2, se puede observar un patrón de difracción cuya concentración de irradiancia se ubica en el centro del mismo. Cuando se utiliza el arreglo de fibras ópticas plásticas más delgadas la respuesta espectral se ensancha y se comienzan a diferenciar algunos de los órdenes de difracción producidos. Por su parte, la muestra 3 presentó un comportamiento estable tanto en intensidad como en espaciamento de los órdenes de difracción. Los valores mínimos de intensidad luminosa entre órdenes son casi nulos.

Por otro lado, la muestra 4 presenta estabilidad en términos de intensidad, sin embargo se puede apreciar que el patrón de difracción presenta mínimos de intensidad cada dos máximos. Se pudo deducir que a medida que la fuente luminosa variaba para obtener más precisión en la simulación aumentando el número de rayos trazados, dos picos máximos continuos se unían para formar un solo orden de difracción.

Por último, la muestra 5 presentó un comportamiento uniforme a lo largo del patrón de difracción, tanto en términos de intensidad como de espaciamento entre órdenes. Los mínimos que se obtuvieron fueron iguales a cero o muy cercanos.

En términos generales se alcanzaron separaciones angulares mayores en las muestras hechas con fibra óptica más delgada. Los comportamientos de algunas muestras produjeron patrones de difracción en donde visualmente no pueden reconocerse los máximos de intensidad pero sí por medio del detector integrado en el simulador. Las muestras de sílice tuvieron comportamientos similares y fueron estables en términos de intensidad, teniendo separaciones angulares mayores entre órdenes en el caso del arreglo de fibras ópticas monomodo.

A medida que la longitud de onda disminuye, las separaciones angulares entre órdenes de difracción también lo hacen. Este es un comportamiento común de la luz cuando sufre los efectos del fenómeno de difracción, el cual plantea que las longitudes de onda más altas se difractan en ángulos mayores, principio que puede visualizarse mejor en la siguiente sección en donde se muestran los resultados de la experimentación con múltiples longitudes de onda.

Tabla 6.7 Parámetros obtenidos en simulador con  $\lambda=532$  nm y  $m=1$ .

Muestra	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
1	0.1020	0.0292	0.95	5215.58	1.000000
2	0.4102	0.1175	3.85	1296.86	0.999998
3	0.8148	0.2334	7.65	652.93	0.999992
4	0.8351	0.2392	7.84	637.03	0.999991
5	2.2049	0.6316	20.72	241.27	0.999939

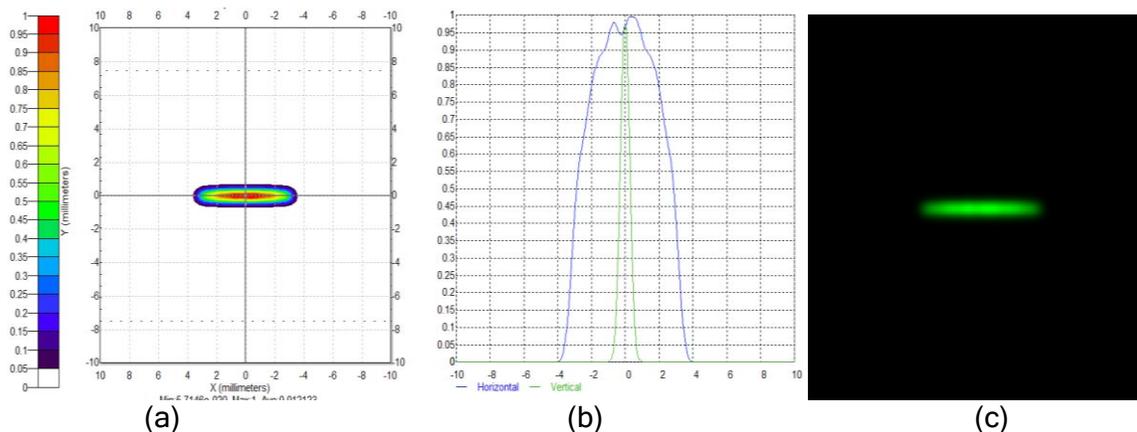


Figura 6.12. Resultados de la simulación con 532 nm de la muestra 1: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

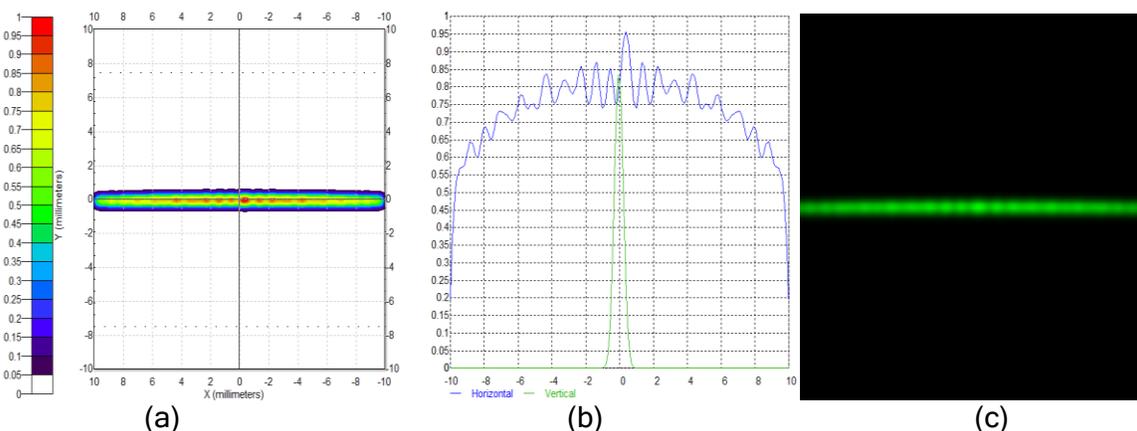


Figura 6.13. Resultados de la simulación con 532 nm de la muestra 2: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

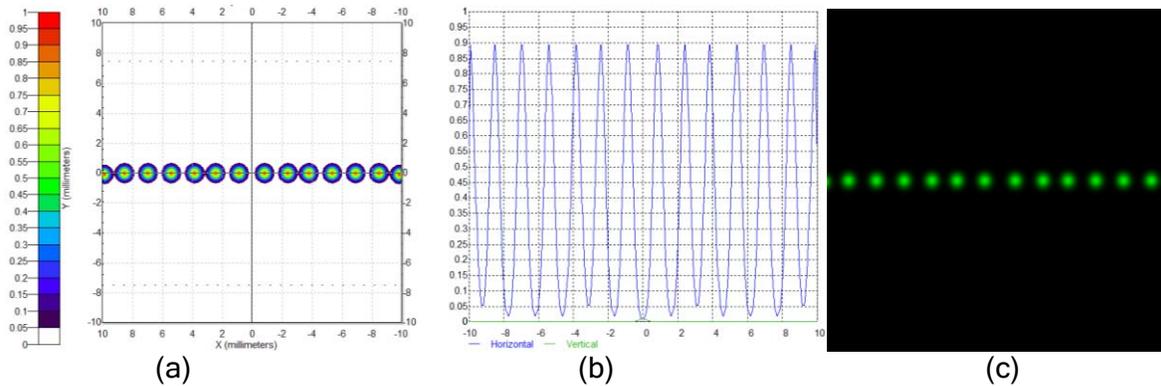


Figura 6.14. Resultados de la simulación con 532 nm de la muestra 3: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

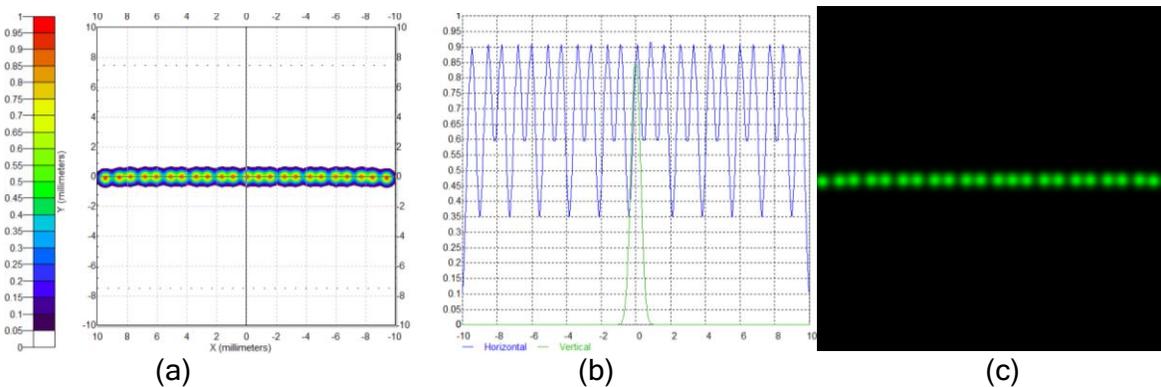


Figura 6.15. Resultados de la simulación con 532 nm de la muestra 4: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

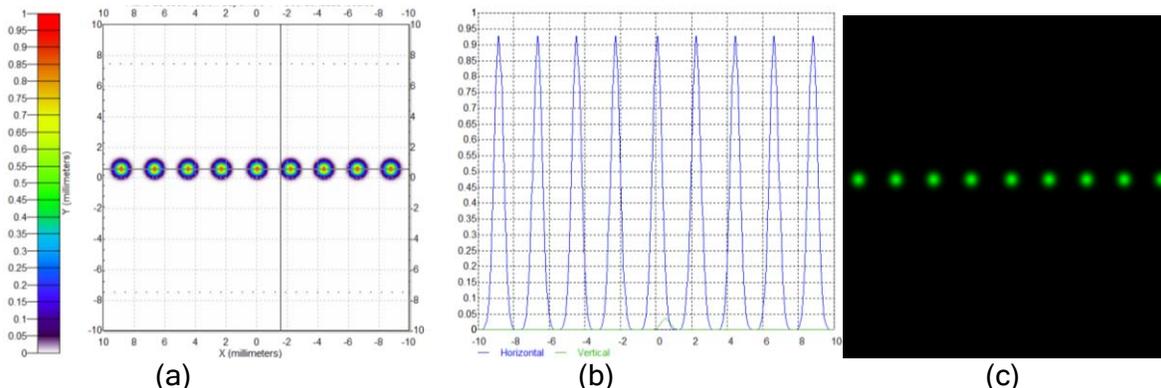


Figura 6.16. Resultados de la simulación con 532 nm de la muestra 5: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

### 6.3.3 Fuente de amplio espectro

La última fase de la simulación se realizó añadiendo a la instalación virtual una fuente policromática compuesta de diferentes longitudes de onda entre 460 nm y 800 nm. Se realizaron las pruebas correspondientes para cada una de las muestras de fibra óptica, analizando las distancias entre el orden cero y cada una de las franjas del visible. Se obtuvieron las separaciones angulares y los principales parámetros de las rejillas, con el mismo procedimiento de las secciones anteriores.

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados pertenecientes a la muestra 1 y en la Figura 6.17 los planos de irradiancia y el patrón de difracción que se produjo al hacer incidir luz sobre la muestra. Se puede apreciar que la separación angular de los componentes espectrales de la fuente aumenta al variar la longitud de onda de forma ascendente, teniendo menores separaciones entre longitudes de onda cercanas al ultravioleta y mayores separaciones en longitudes de onda cercanas al infrarrojo.

En esta muestra las separaciones angulares en el rango visible son menores a  $0.05^\circ$  y en el plano de irradiancia no se puede distinguir claramente la separación de cada una de las franjas de color, sino solamente un patrón de luz blanca con concentración de intensidad en la zona central del mismo.

Tabla 6.8 Parámetros obtenidos en simulador de la muestra 1 con fuente SC y  $m=1$ .

$\lambda$ [ nm ]	c [ mm ]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
460	0.4690	0.0269	1.02	980.77	1.0
475	0.4881	0.0280	1.03	973.16	
490	0.5087	0.0291	1.04	963.15	
520	0.5307	0.0304	1.02	979.83	
550	0.5402	0.0310	0.98	1018.06	
570	0.5819	0.0333	1.02	979.62	
590	0.6118	0.0351	1.04	964.31	
615	0.6449	0.0369	1.05	953.70	
640	0.6822	0.0391	1.07	938.10	
720	0.7222	0.0414	1.00	996.96	
800	0.7758	0.0445	0.97	1031.16	

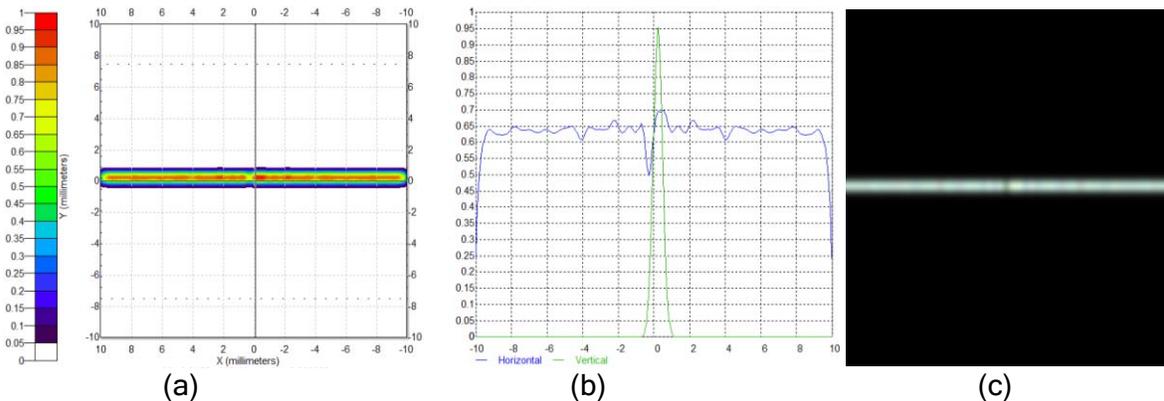


Figura 6.17. Resultados de la simulación con fuente policromática de la muestra 1: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

En la Tabla 6.9 se muestran los datos obtenidos de la muestra 2 y en la Figura 6.18 se muestran los resultados gráficos de la misma. Se observa el incremento de la separación angular a medida que la longitud de onda crece, además se siguen presentando separaciones angulares menores a  $1^\circ$  como en el caso anterior. Con esta muestra se pueden diferenciar los componentes espectrales del haz de luz incidente.

En el plano de irradiancia se puede observar al orden central de difracción acompañado de algunos de los primeros órdenes a cada lado. El orden cero está compuesto de luz blanca y cada uno de los órdenes posee a los diferentes componentes espectrales que emite la fuente luminosa, separándolos angularmente unos de otros. Cada uno de los órdenes disminuye en intensidad al alejarse del orden cero.

Tabla 6.9 Parámetros obtenidos en simulador de la muestra 2 con fuente SC y  $m=1$ .

$\lambda$ [nm]	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
460	1.8820	0.1078	4.09	244.43	0.999998
475	1.9578	0.1122	4.12	242.62	0.999998
490	2.0410	0.1169	4.17	240.08	0.999998
520	2.1295	0.1220	4.10	244.19	0.999998
550	2.2262	0.1275	4.05	247.06	0.999998
570	2.3345	0.1338	4.10	244.17	0.999997
590	2.4544	0.1406	4.16	240.39	0.999997
615	2.5870	0.1482	4.21	237.73	0.999997
640	2.7359	0.1568	4.27	233.92	0.999996
720	2.8969	0.1660	4.02	248.54	0.999996
800	3.0855	0.1768	3.86	259.28	0.999995

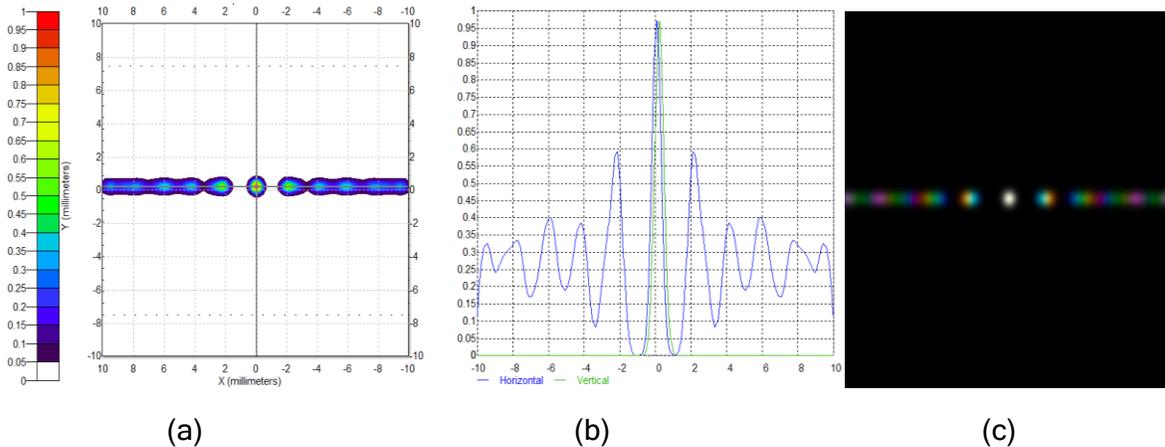


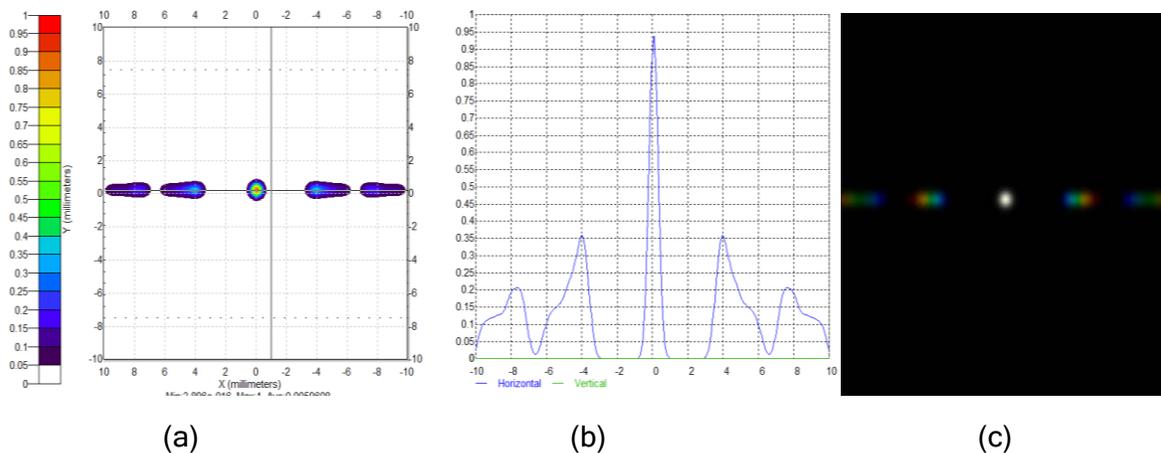
Figura 6.18. Resultados de la simulación con fuente policromática de la muestra 2: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

Posteriormente en la Tabla 6.10 se colocaron los resultados de la muestra 3, acompañados de los resultados gráficos de la Figura 6.19. Esta muestra hecha de un arreglo de fibra óptica multimodo y presenta mayores separaciones angulares que las muestras anteriores, alcanzando hasta  $0.3^\circ$ .

En este caso se obtuvo un orden cero de luz blanca con gran intensidad luminosa y diversos órdenes de difracción a cada lado. Estos órdenes disminuyen en intensidad al alejarse del orden central. La simulación muestra que la intensidad luminosa cae hasta valores nulos al alejarse de cada máximo, dando como resultado que la irradiancia alrededor de cada orden sea nula.

Tabla 6.10 Parámetros obtenidos en simulador de la muestra 3 con fuente SC y  $m=1$ .

$\lambda$ [ nm ]	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
460	3.6232	0.2076	7.88	126.96	0.999993
475	3.7753	0.2163	7.95	125.82	0.999993
490	3.9406	0.2258	8.04	124.35	0.999992
520	4.1211	0.2361	7.93	126.18	0.999992
550	4.3189	0.2475	7.85	127.35	0.999991
570	4.5367	0.2599	7.96	125.64	0.999990
590	4.7776	0.2737	8.10	123.49	0.999989
615	5.0455	0.2891	8.20	121.89	0.999987
640	5.3453	0.3063	8.35	119.73	0.999986
720	5.6830	0.3256	7.89	126.69	0.999984
800	6.0661	0.3476	7.58	131.88	0.999982



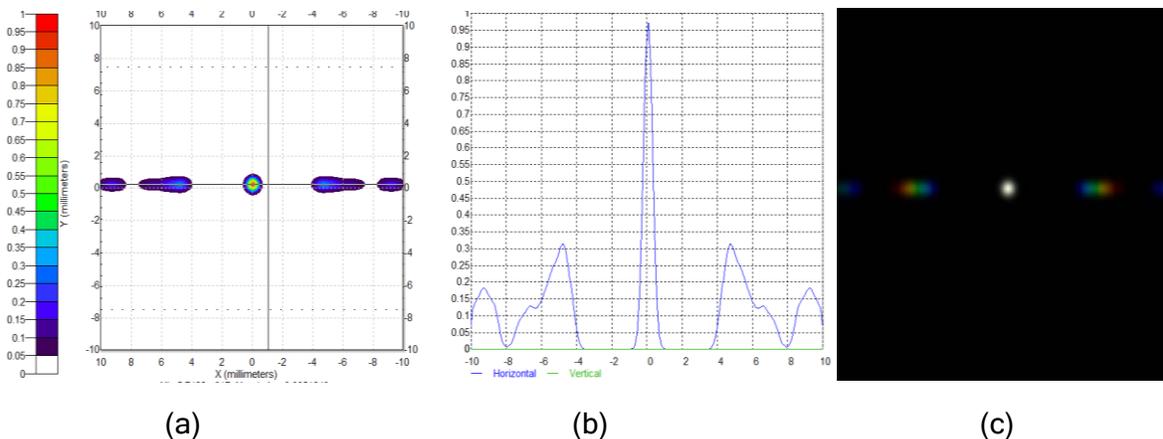
(a) (b) (c)  
 Figura 6.19. Resultados de la simulación con fuente policromática de la muestra 3:  
 (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

En el caso de la muestra 4 hecha de fibra óptica monomodo se obtuvieron los parámetros de la Tabla 6.11 y los gráficos de la Figura 6.20. El comportamiento de esta muestra es muy similar al del arreglo de fibras multimodo, sin embargo las separaciones angulares son mayores, teniendo hasta  $0.4^\circ$  de separación para la franja más cercana al infrarrojo.

En el gráfico de irradiancia y en el patrón de difracción se puede apreciar al orden cero acompañado de diversos órdenes a los costados. Cada orden tiene los componentes espectrales del rayo incidente, separados por distancias determinadas, desde las longitudes de onda menores hasta las mayores.

Tabla 6.11 Parámetros obtenidos en simulador de la muestra 4 con fuente SC y  $m=1$ .

$\lambda$ [ nm ]	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
460	4.3569	0.2496	9.47	105.58	0.999991
475	4.5398	0.2601	9.56	104.63	0.999990
490	4.7387	0.2715	9.67	103.40	0.999989
520	4.9559	0.2839	9.53	104.92	0.999988
550	5.1940	0.2976	9.44	105.89	0.999987
570	5.4560	0.3126	9.57	104.47	0.999985
590	5.7460	0.3292	9.74	102.68	0.999983
615	6.0685	0.3477	9.87	101.34	0.999982
640	6.3094	0.3684	10.05	99.54	0.999979
720	6.8359	0.3917	9.49	105.32	0.999977
800	7.2974	0.4181	9.12	109.63	0.999973



(a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.  
 Figura 6.20. Resultados de la simulación con fuente policromática de la muestra 4:

Finalmente se presentan los resultados de la muestra 5 en la Tabla 6.12 y en la Figura 6.21. En esta simulación se alcanzaron los valores máximos de separación angular entre componentes espectrales, los cuales fueron de hasta  $0.8^\circ$  en el caso de la franja de color más cercana al infrarrojo. En el patrón de difracción producido por el arreglo de fibras ultra delgadas se aprecia al orden cero acompañado de los primeros órdenes a cada lado. Estos órdenes, al igual que en los casos anteriores, disminuyen de intensidad al ser más lejanos.

En esta sección cabe mencionar que la longitud del primer orden de difracción fue aumentando para cada muestra experimental. Las separaciones angulares para la muestra 1 fueron las menores y las de la muestra 5 las mayores, por lo que se produjo que los órdenes fueran cada vez más largos en esta última muestra aunque fueran similares en ancho e intensidad.

Tabla 6.12 Parámetros obtenidos en simulador de la muestra 5 con fuente SC y m=1.

$\lambda$ [ nm ]	c [mm]	$\beta$ [°]	D [ $\frac{\mu rad}{nm}$ ]	Factor P [ $\frac{nm}{mm}$ ]	Magnificación Anamórfica
460	9.2670	0.5309	20.15	49.64	0.999957
475	9.6381	0.5522	20.29	49.28	0.999954
490	10.0431	0.5754	20.50	48.79	0.999950
520	10.4742	0.6001	20.14	49.64	0.999945
550	10.9507	0.6274	19.91	50.22	0.999940
570	11.4849	0.6580	20.15	49.63	0.999934
590	12.0771	0.6919	20.47	48.85	0.999927
615	12.7337	0.7295	20.71	48.29	0.999919
640	13.4699	0.7717	21.05	47.51	0.999909
720	14.2726	0.8177	19.82	50.44	0.999898
800	15.1934	0.8705	18.99	52.65	0.999885

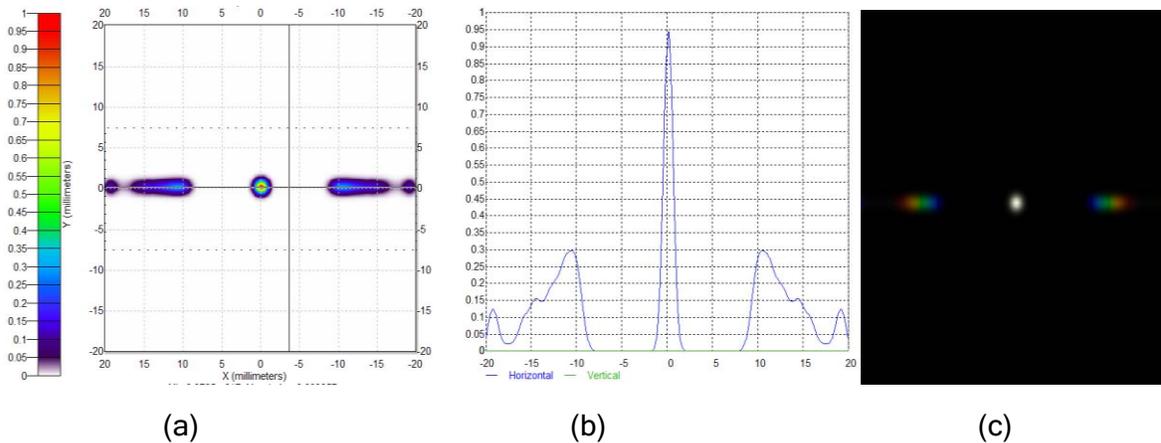


Figura 6.21. Resultados de la simulación con fuente policromática de la muestra 5: (a) Plano de irradiancia, (b) patrón de difracción y (c) aspecto realista.

Con esto termina la demostración de resultados de la simulación realizada en un ambiente virtual por medio del software para elementos ópticos TracePro. A continuación se presenta una comparación entre los parámetros teóricos con los que se diseñaron los prototipos funcionales y los resultados de las etapas experimentales y simuladas, para poder discutir y concluir acerca del comportamiento de las diferentes rejillas de difracción de fibra óptica estudiadas en esta tesis.

#### 6.4 Comparación y discusión del comportamiento de las rejillas de fibra óptica

Las rejillas de difracción hechas de arreglos de fibra óptica se evaluaron por medio de tres métodos distintos: teórico, experimental y simulado. Cada método arrojó los parámetros correspondientes de las muestras al hacerlas interactuar con fuentes luminosas. Para un análisis detallado de estos parámetros se procesó la información conseguida y en el Anexo

Se encuentran los gráficos teóricos, experimentales y simulados de cada una de las rejillas de difracción al utilizarse con fuentes láser monocromáticas o de amplio espectro.

#### 6.4.1 El caso de las fuentes láser monocromáticas

En la Figura 6.22 se ilustra el comportamiento de las rejillas de difracción utilizadas en este estudio al hacer incidir un haz de luz monocromática a 633 nm, en esta figura se presenta además la comparación entre los datos teóricos, experimentales y simulados. Los datos obtenidos de las cinco muestras en la fase teórica y simulada para este primer caso son muy similares, mientras que la fase experimental sólo muestra los datos de las muestras 3, 4 y 5. En este gráfico puede observarse que la separación angular entre órdenes de difracción aumenta al usar fibras ópticas cada vez más delgadas.

En el caso del estudio realizado con la fuente láser monocromática a 532 nm se obtuvieron curvas similares, sólo que la separación angular que experimentaron las muestras fueron menores a las presentadas con la fuente a 633 nm. Se puede decir que a mayor longitud de onda, la separación angular que se obtiene con las rejillas de fibra óptica es mayor. Se agregaron líneas de error típico en porcentaje y los valores obtenidos de forma experimental y simulada presentan variaciones promedio menores al 7% respecto a los valores teóricos para el estudio con la fuente a 633 nm y 532 nm. Estos porcentajes de variación se presentaron en las muestras 1, 2, 3 y 5, que son las muestras hechas con dos tipos de fibra óptica plástica, fibra MMF y microhilos de BK7 respectivamente.

Las diferencias entre los resultados teóricos y las simulaciones son sutiles, mientras que los resultados experimentales difieren más respecto a la teoría. Las variaciones que se observaron entre la simulación y la parte teórica puede deberse al grado de aproximación del software TracePro, el cual maneja operaciones mediante métodos numéricos, arrojando resultados más precisos y cercanos a un comportamiento ideal de las rejillas de fibra óptica. Este software proporciona además alineación de componentes en automático y disminuye considerablemente las pérdidas que se puedan presentar en la instalación integrando elementos ideales.

En el caso experimental, la existencia de estas variaciones se puede deber a errores de alineamiento de los componentes en la instalación. En la parte teórica de este estudio se considera un ángulo de haz incidente igual a cero, sin embargo al considerar un error de alineamiento en la práctica y por lo tanto un ángulo de haz incidente diferente a cero, se obtiene un cambio en el ángulo del haz difractado. Las diferencias en los resultados también pueden deberse al error por alineamiento del arreglo de fibras ópticas y por errores de medición.

En el caso de la muestra 4, hecha de fibras SMF, se presentó un comportamiento singular, ya que se obtuvieron diferencias promedio de hasta un 15% de los resultados experimentales y simulados respecto a los teóricos. Parte de este porcentaje se debe a las razones anteriormente mencionadas de alineación de componentes en la instalación, alineación del arreglo de fibras ópticas y errores de medición. Sin embargo también se debe de considerar la geometría de la fibra y el índice de refracción, los cuales alteran el comportamiento de la trayectoria de la luz y por lo tanto también al efecto del fenómeno de difracción producido.

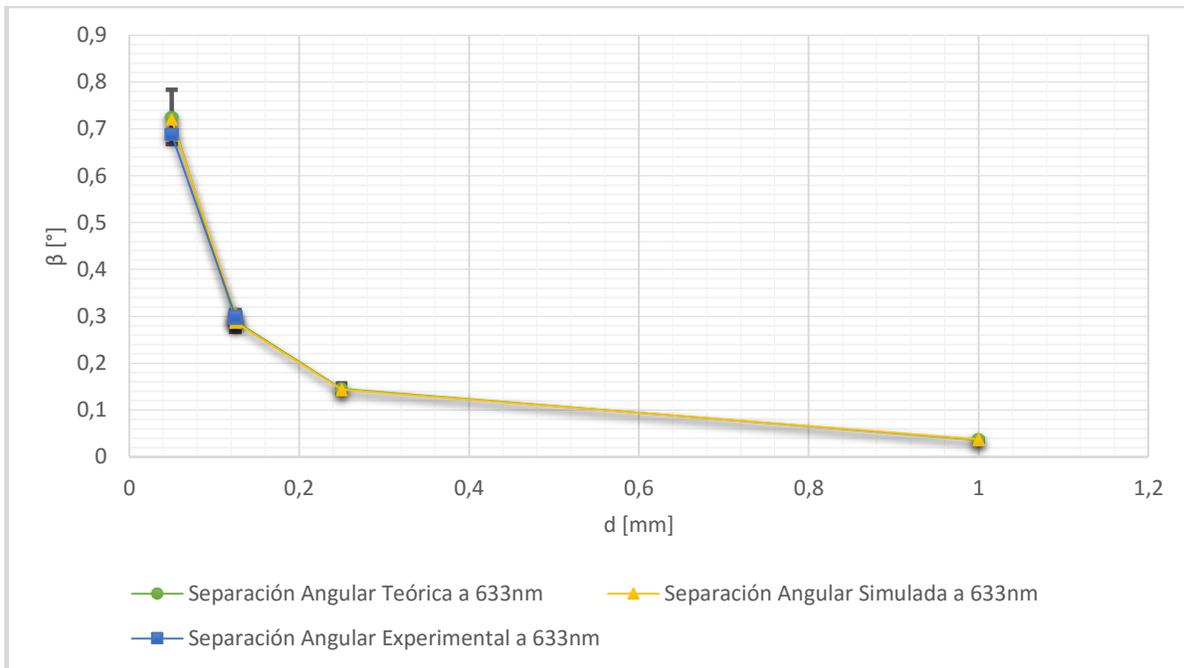


Figura 6.22. Separación angular  $\beta$  vs diámetro de las fibras  $d$ , usando una fuente de  $\lambda=633$  nm

Para el cálculo teórico de los parámetros de la muestra 4 se consideró la dimensión del diámetro externo y siendo igual al de una fibra MMF, los resultados obtenidos para estas dos muestras fueron idénticos. En la parte simulada y experimental se observó que, contrario a lo que se pensaba, las separaciones angulares obtenidas eran ligeramente mayores a las obtenidas con el arreglo de fibras MMF y los otros parámetros cambiaban de igual forma al ser dependientes de la separación angular.

Para un análisis más profundo y un modelado matemático más preciso de las rejillas de difracción hechas con arreglos de fibra óptica, se puede partir de la ecuación general de rejilla, la cual expresa el comportamiento de la luz al interactuar con un elemento difractivo, sin embargo deben incluirse factores como el índice de refracción y geometría de la fibra.

En esta tesis se estudian 5 tipos comunes de fibra óptica, usando expresiones generales para rejillas de difracción, sin embargo el comportamiento difractivo de las rejillas puede cambiar al utilizar otro tipo de fibras, como por ejemplo las microestructuradas o fibras que mantienen la polarización bow tie o panda, las cuales no solo cambian en cuanto a geometría interna, sino también en índices de refracción a pesar de tener diámetros externos similares.

Al usar longitudes de onda de 532 nm y 633 nm se obtuvieron separaciones angulares menores a  $1^\circ$  en todas las muestras. Las rejillas de difracción comerciales holográficas o grabadas presentan separaciones angulares entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y siendo aún más precisos, es común encontrarlas a partir de  $10^\circ$  hasta  $70^\circ$  para modos de reflexión o transmisión. En diversas ocasiones se requiere que las rejillas de difracción trabajen con separaciones angulares altas para poder acoplar los rayos difractados a otros elementos ópticos sin complicaciones debidas al espacio entre órdenes. Además la gran mayoría de aplicaciones utilizan los primeros órdenes de difracción, por lo que resulta conveniente separarlos por distancias considerables y trabajar sólo con los órdenes menores. Sin embargo, también existen aplicaciones que requieren órdenes de difracción mayores y las rejillas como las

Echelle están optimizadas para concentrar la potencia luminosa en estos órdenes. Estas rejillas especiales son de periodo largo y pueden llegar a trabajar con separaciones angulares cercanas a  $1^\circ$ . En contexto, las rejillas de difracción basadas en arreglos de fibra óptica podrían tener futuro en ciertas aplicaciones al igual que las Echelle, aunque para esto resulta muy necesario un estudio dedicado a la eficiencia e intensidad luminosa que las rejillas especiales de fibra óptica pueden llegar a proporcionar.

Por otro lado en la Figura 6.23 se muestran los gráficos correspondientes a los datos teóricos, experimentales y simulados del parámetro de dispersión angular para la fuente de  $\lambda=633\text{ nm}$ . La curva tiene un comportamiento similar al de separación angular. En esta gráfica se observa que la dispersión aumenta en las rejillas hechas de fibra óptica más delgada.

Teóricamente el parámetro la dispersión angular no presenta diferencias entre la longitud de onda de  $633\text{ nm}$  y la de  $532\text{ nm}$ . Sin embargo si existen diferencias entre los resultados teóricos y los experimentales. Se añadieron líneas de error típico en porcentaje y las variaciones promedio resultaron menores al 7%. Este porcentaje de error está directamente relacionado al que se obtuvo en la separación angular debido a que la dispersión se expresó en función de este parámetro.

Las rejillas de difracción comerciales más comunes presentan valores muy altos de dispersión como resultado de su dependencia de la separación angular y de la longitud de onda en la que trabajen. En el caso de las rejillas de periodo largo los rangos de dispersión angular pueden ser menores respecto a las que tienen grandes densidades de surcos, pero al estar optimizadas a ciertas longitudes de onda los valores de dispersión que presentan siguen siendo relativamente altos.

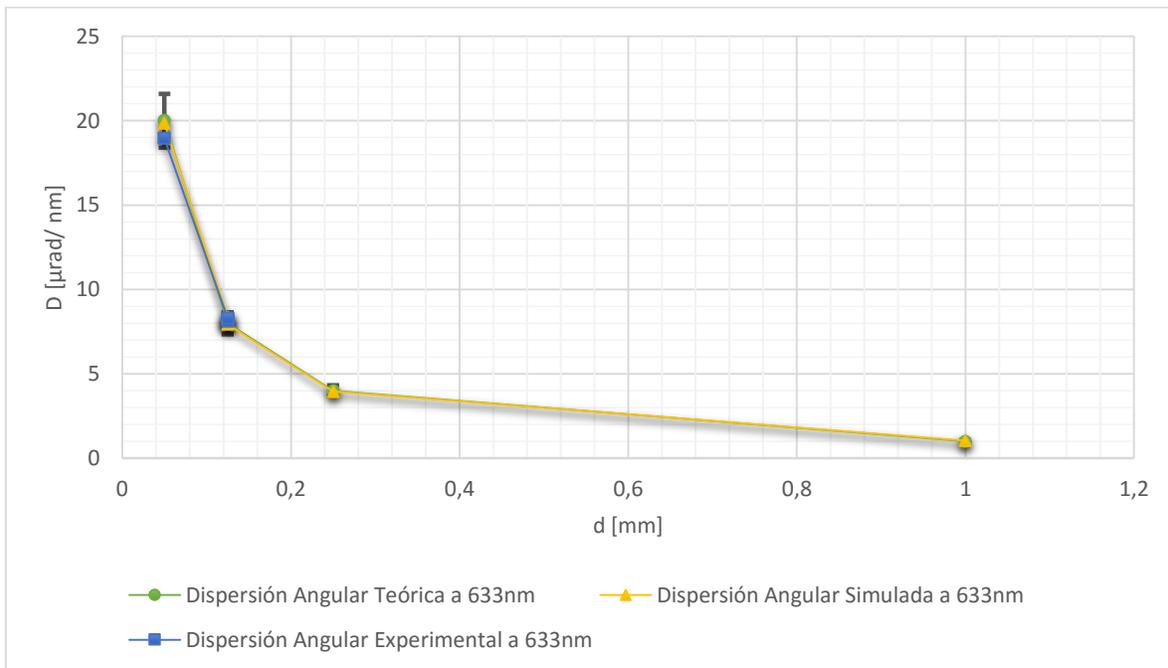


Figura 6.23. Dispersión angular  $D$  vs diámetro de las fibras  $d$ , usando fuente de  $\lambda=633\text{ nm}$ .

Por último en las Figuras 6.24 y 6.25 se tienen los gráficos correspondientes al Factor P y a la magnificación anamórfica respectivamente. Los gráficos de la Figura 6.24 presentan

curvas con comportamientos similares, en donde se puede apreciar que a medida que incrementa el diámetro de las fibras ópticas utilizadas en los arreglos, también lo hace el Factor P. En algunas rejillas de difracción comerciales se especifica este parámetro y normalmente se llegan a requerir valores mínimos. Se colocaron líneas de error típico en porcentaje y se encontraron variaciones promedio de hasta 7%, lo cual concuerda con los parámetros anteriores ya que el Factor P presenta dependencia indirecta de la dispersión angular.

La magnificación anamórfica por su parte describe la relación entre el ancho de un haz difractado y el ancho del haz incidente. En la Figura 6.25 se observan curvas en donde el valor de este parámetro disminuye conforme disminuye el diámetro de las fibras ópticas utilizadas. Esto quiere decir que al utilizar fibras ópticas más delgadas en las rejillas se consigue un haz de luz difractado cada vez más estrecho respecto al haz incidente, pudiéndose notar además que los valores de magnificación obtenidos con un haz láser a 532 nm son ligeramente mayores que aquellos obtenidos con la fuente a 633 nm, intuyendo entonces que a longitudes de onda más grandes la magnificación anamórfica disminuye y los rayos difractados son cada vez más estrechos. Se incluyeron líneas de error típico, encontrando variaciones en resultados muy inferiores al 1%. Esto se debe a que la expresión para el cálculo de este parámetro contiene a la función coseno, la cual genera valores muy similares al ingresar argumentos que cambian sólo en algunos decimales.

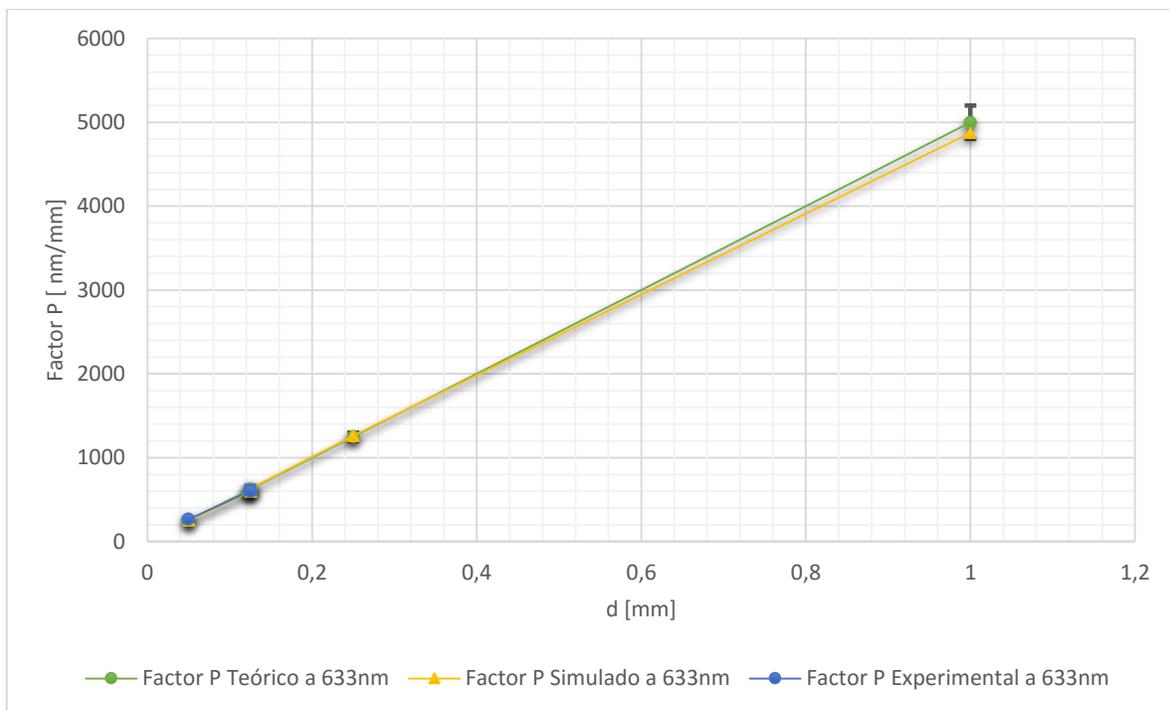


Figura 6.24. Factor  $P$  vs diámetro de las fibras  $d$ , usando una fuente de  $\lambda=633$  nm.

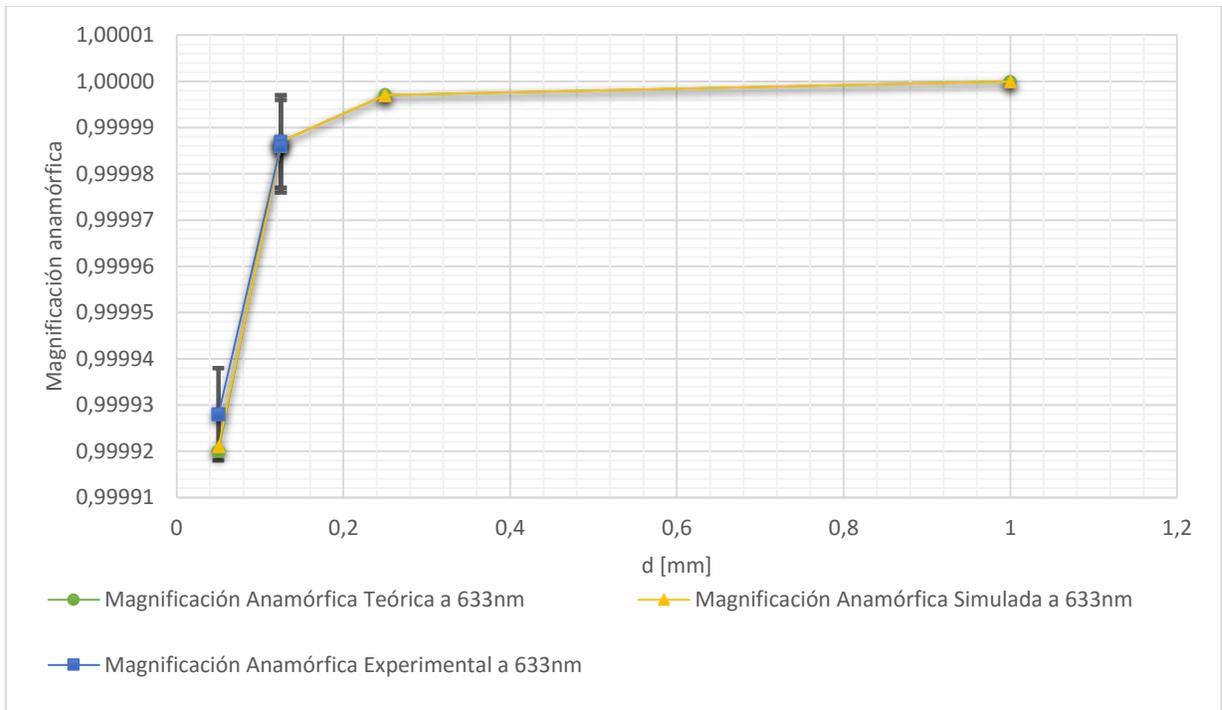


Figura 6.25. Magnificación Anamórfica vs diámetro de las fibras  $d$ , usando una fuente de  $\lambda=633$  nm.

## 6.4.2 El caso de la fuente de amplio espectro

Se realizaron los gráficos correspondientes al uso de una fuente láser de amplio espectro. En estos gráficos se hace variar la longitud de onda para cada una de las muestras, mostrando el comportamiento que tienen sus principales parámetros dentro del rango visible. Como ejemplo ilustrativo, en la Tabla 6.13 se muestra la comparación de la distancia “c” y separación angular de los estudios teórico, experimental y simulado de la muestra 5 con la fuente de amplio espectro.

**Tabla 6.13 Comparación de parámetros de la muestra 5 con una fuente de amplio espectro.**

$\lambda$ [ nm]	Estudio Teórico		Estudio Experimental		Estudio Simulado	
	c [mm]	$\beta$ [°]	c [mm]	$\beta$ [°]	c [mm]	$\beta$ [°]
460	9.20	0.5271	8.75	0.5013	9.2670	0.5309
475	9.50	0.5443	9.92	0.5684	9.6381	0.5522
490	9.80	0.5615	10.19	0.5838	10.0431	0.5754
520	10.40	0.5959	10.69	0.6125	10.4742	0.6001
550	11.00	0.6303	11.44	0.6554	10.9507	0.6274
570	11.40	0.6532	12.00	0.6875	11.4849	0.6580
590	11.80	0.6761	12.58	0.7207	12.0771	0.6919
615	12.30	0.7048	13.05	0.7477	12.7337	0.7295
640	12.80	0.7334	13.55	0.7763	13.4699	0.7717
720	14.40	0.8251	15.05	0.8622	14.2726	0.8177
800	16.00	0.9168	16.76	0.9602	15.1934	0.8705

En los casos anteriores se ha visto que los parámetros de dispersión angular, Factor P y magnificación anamórfica dependen directa o indirectamente de la separación angular, por lo que en esta sección se presenta como referencia al gráfico comparativo de este último parámetro. Para consultar con más detenimiento los resultados de los parámetros restantes se sugiere ir al Anexo B en donde se encuentran las gráficas correspondientes para cada muestra, obtenidas de forma teórica, experimental y simulada.

La Figura 6.26 es un gráfico comparativo de separación angular vs longitud de onda de las cinco muestras. En esta gráfica puede apreciarse que a medida que la longitud de onda incrementa, la separación angular también lo hace y los valores más altos de separación angular se obtienen en las rejillas hechas con arreglos de fibra óptica más delgada.

Para analizar con detenimiento el comportamiento de los resultados de cada una de las muestras se realizaron gráficos individuales. El primero de estos se ilustra en la Figura 6.27 que contiene los resultados teóricos y simulados que arrojó la muestra 1, a este mismo gráfico se le agregaron las líneas de error típico en porcentaje demostrando que en promedio se tienen variaciones menores al 6%. La Figura 6.28 es la correspondiente a la muestra 2, también con líneas de error típico al 6%.

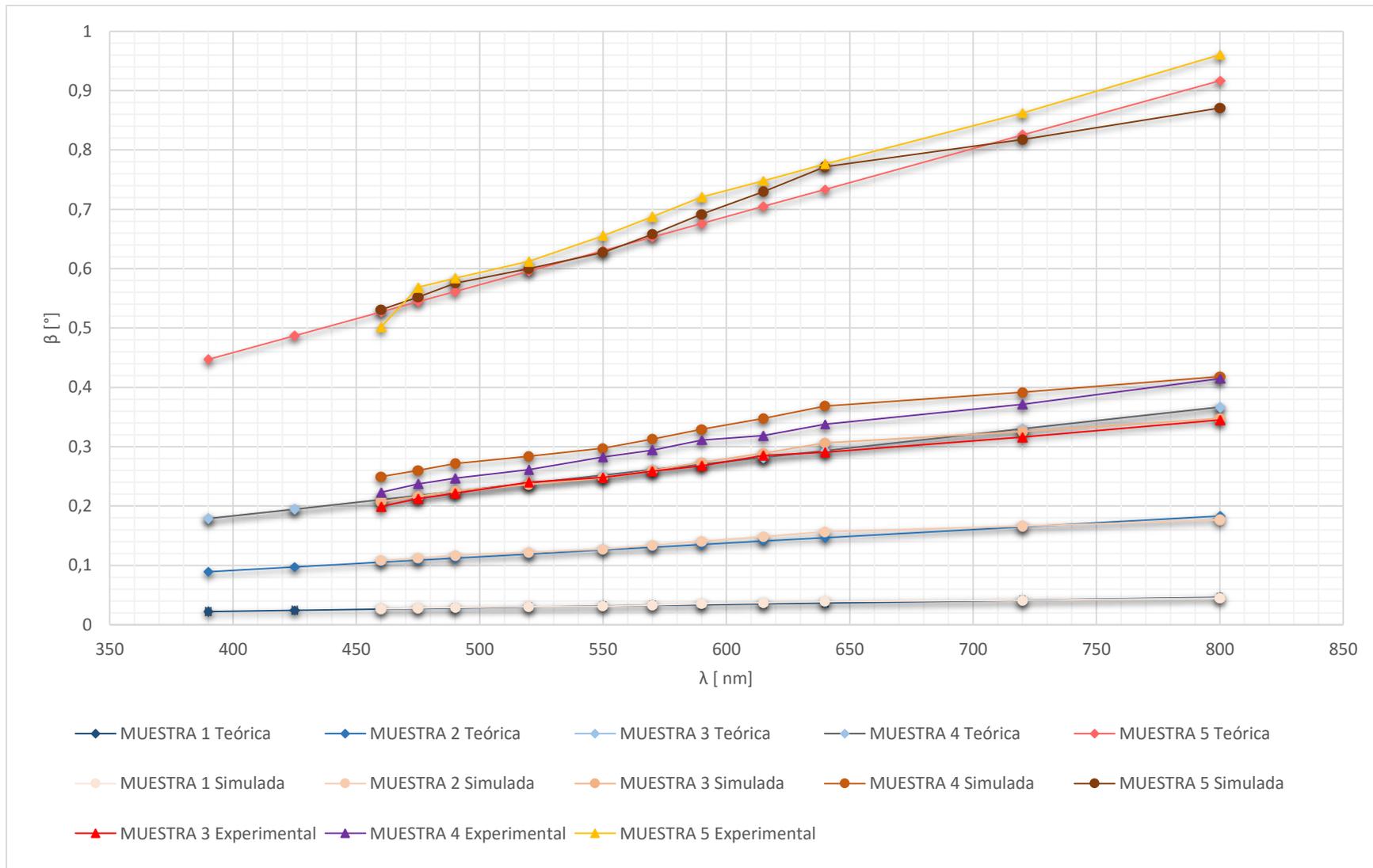


Figura 6.26. Separación angular  $\beta$  vs longitud de onda  $\lambda$ , usando una fuente de amplio espectro.

Los estudios teórico, experimental y simulado de la muestra 3 se proporcionan en la Figura 6.29, en este caso se observaron diferencias promedio de hasta 9% respecto a los datos teóricos. La Figura 6.30 ilustra los resultados de la muestra 4, la cual tuvo diferencias de hasta un 16% y finalmente la Figura 6.31 contiene los resultados gráficos de la muestra 5, que también tuvo diferencias de hasta un 9% en promedio. El rango de variaciones en esta sección puede deberse a las aproximaciones de las longitudes de onda. Se ha establecido que los valores de longitud de onda de la etapa experimental se utilizaron como referencia para la ubicación de cada franja de color, ya que la obtención de resultados se hizo de forma visual sin ayuda de detectores que indicaran de forma precisa la longitud de onda de cada haz difractado.

La muestra 4 presentó separaciones angulares mayores de las que se esperaban teóricamente. En un principio se consideró que las muestras 3 y 4 presentarían resultados similares al tener diámetros externos de igual magnitud, sin embargo no fue así. Esto se atribuye a las características físicas de las fibras, que no se incluyen en la ecuación general de rejilla, como la geometría y el índice de refracción de los materiales que las constituyen, provocando cambios en el patrón de difracción.

La dispersión angular al igual que el Factor P, cambian ligeramente al hacer variar la longitud de onda, sin embargo se pueden encontrar valores más altos de dispersión angular y valores menores del Factor P en las muestras hechas de fibra óptica más delgada. Esto quiere decir que cada muestra tiene un determinado valor promedio de dispersión angular y Factor P para todo un rango de longitudes de onda y que estos parámetros sólo varían significativamente en función de las dimensiones y geometría de la fibra. Por último se observó que la magnificación anamórfica obtenida con cada una de las muestras en el rango visible, disminuye conforme aumenta la longitud de onda (Ver Anexo B). Esto significa que al usar longitudes de onda más altas se obtiene un haz difractado cada vez más estrecho y que además, las rejillas hechas con fibra óptica más delgada presentan los valores más bajos de magnificación anamórfica.

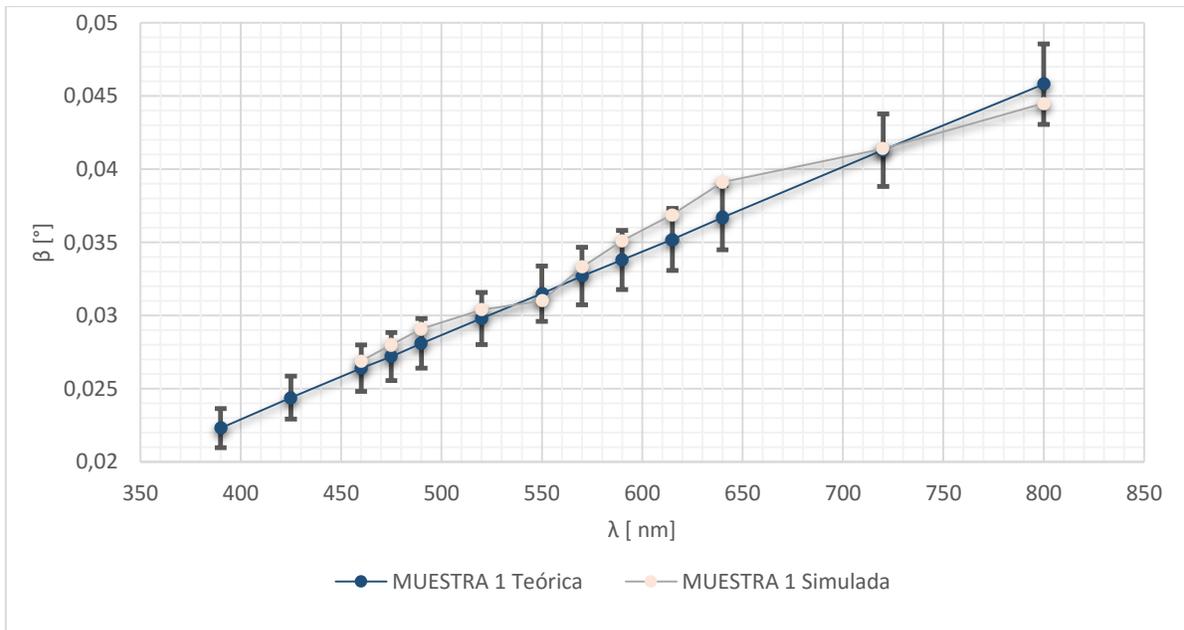


Figura 6.27. Separación angular  $\beta$  vs longitud de onda  $\lambda$ , pertenecientes a la muestra 1, usando una fuente de amplio espectro.

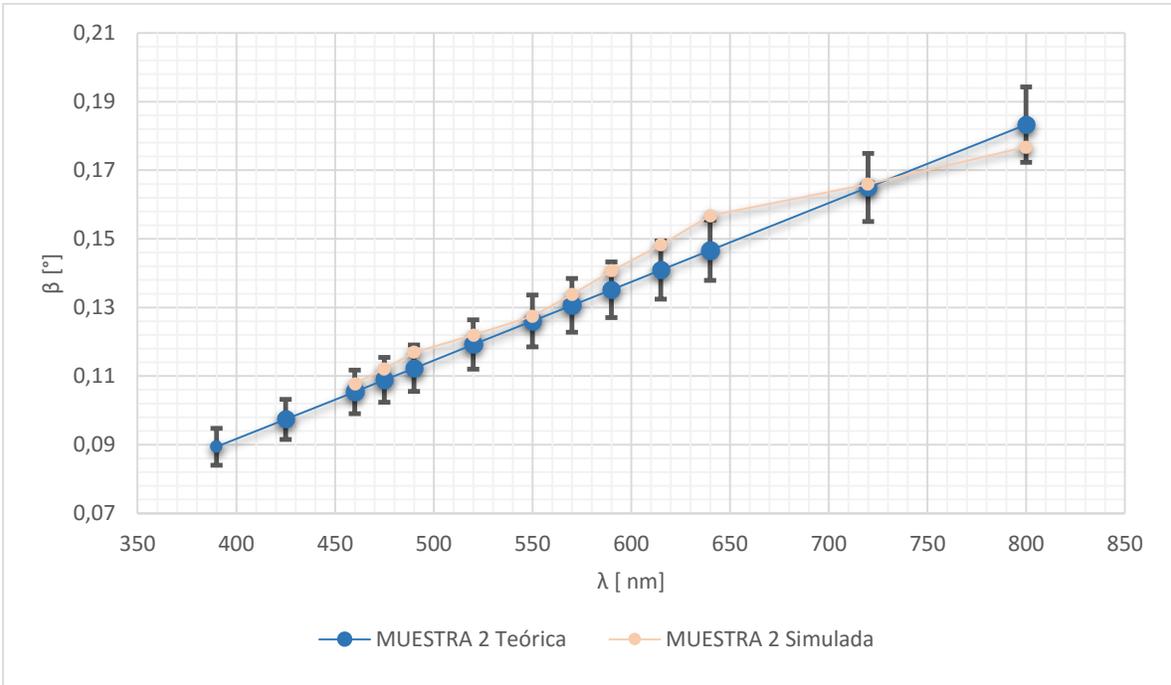


Figura 6.28. Separación angular  $\beta$  vs longitud de onda  $\lambda$ , pertenecientes a la muestra 2, usando una fuente de amplio espectro.

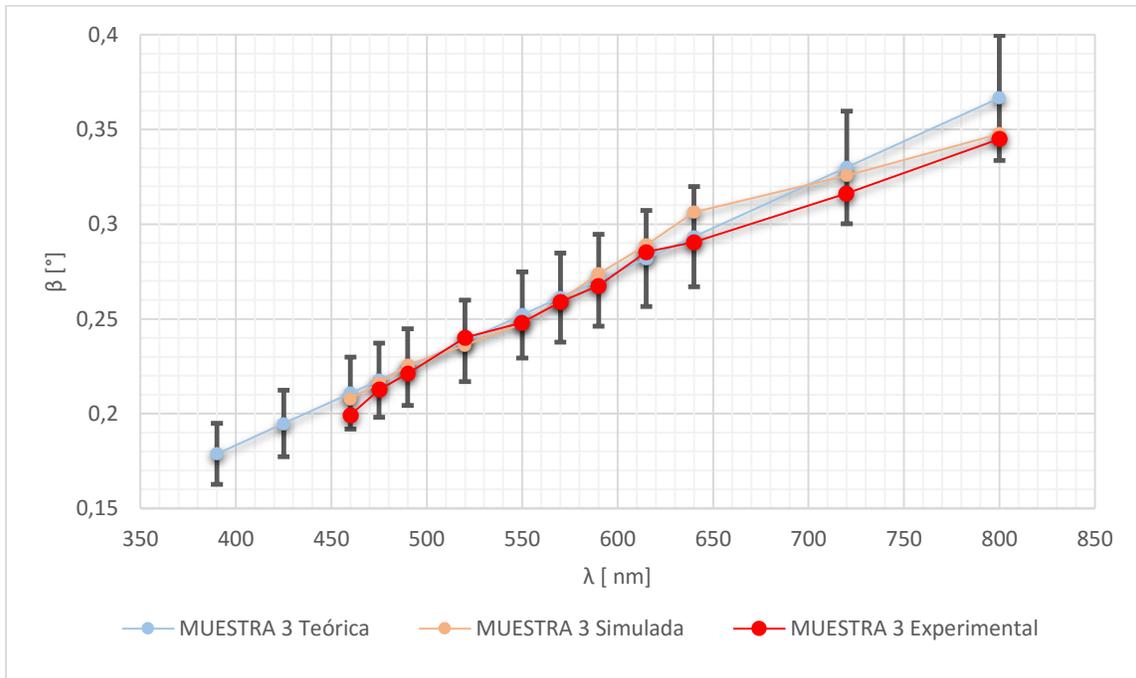


Figura 6.29. Separación angular  $\beta$  vs longitud de onda  $\lambda$ , pertenecientes a la muestra 3, usando una fuente de amplio espectro

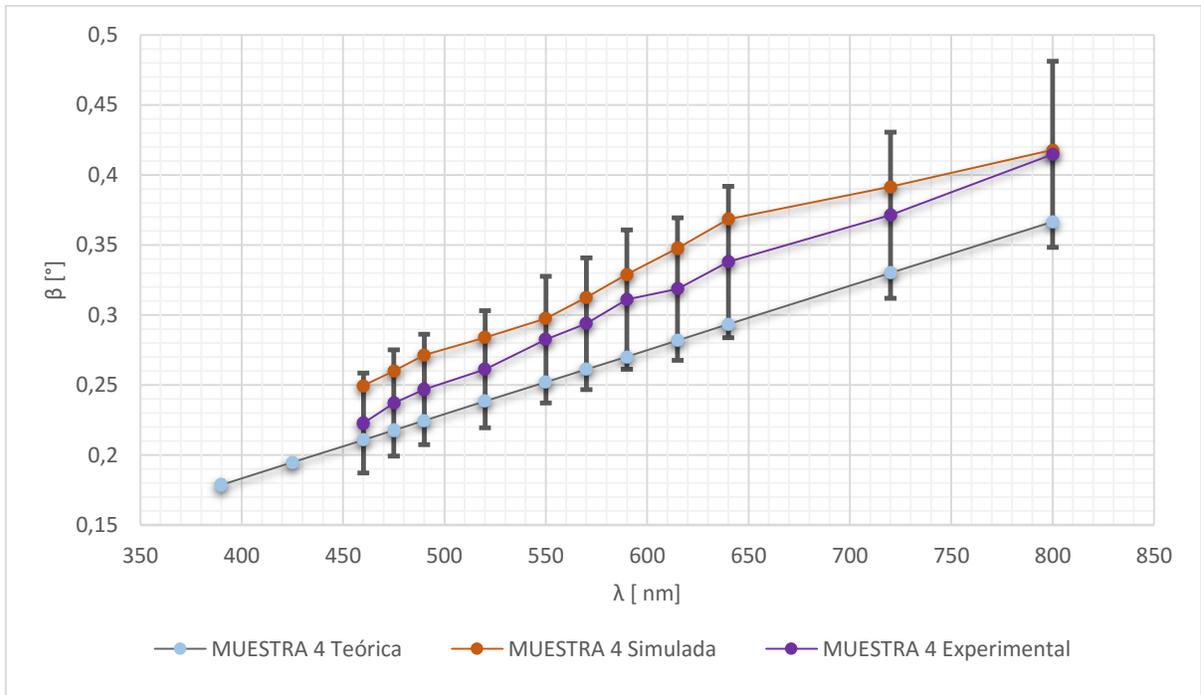


Figura 6.30. Separación angular  $\beta$  vs longitud de onda  $\lambda$ , pertenecientes a la muestra 4, usando una fuente de amplio espectro.

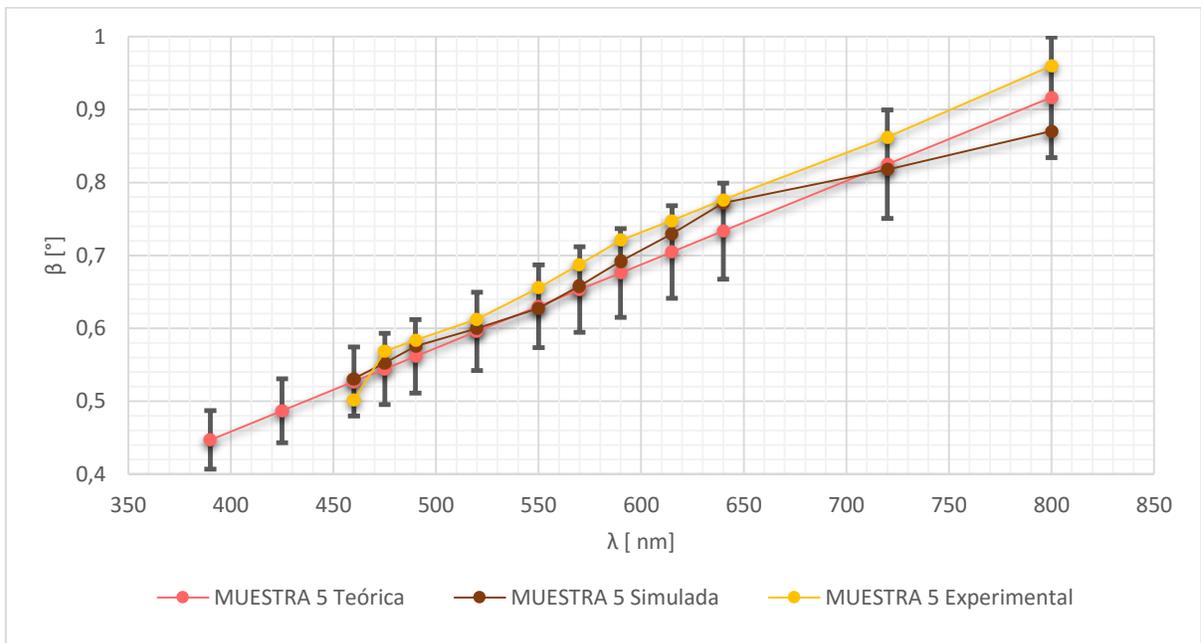


Figura 6.31. Separación angular  $\beta$  vs longitud de onda  $\lambda$ , pertenecientes a la muestra 5, usando una fuente de amplio espectro

### 6.4.3 Rejillas de difracción de fibra óptica frente a rejillas de difracción comunes

El patrón de difracción producido por rejillas de difracción hechas con arreglos de fibra óptica presenta órdenes con separaciones uniformes y altas intensidades incluso en órdenes altos. En contraste las intensidades de los haces difractados, de las rejillas de difracción comunes, disminuyen significativamente conforme el orden incrementa. Se ha visto que las rejillas de difracción hechas con arreglos de fibra óptica producen órdenes de difracción separados por ángulos de hasta  $1^\circ$ , mientras que las rejillas de difracción comunes presentan separaciones angulares mucho mayores (usualmente  $20^\circ < \beta < 70^\circ$ ).

Las rejillas de difracción de fibra óptica pueden llegar a ser mucho más económicas que las rejillas de difracción comunes, ya que sus materiales de fabricación son relativamente sencillos. El proceso de fabricación de las rejillas de difracción hechas con arreglos de fibra óptica no requiere de instrumentación altamente especializada. Sin embargo se pueden seguir optimizando los procedimientos utilizados para su fabricación para conseguir patrones de difracción más nítidos.

Las rejillas de difracción comunes suelen necesitar de manejos muy especiales, ya que el mínimo contacto con el ambiente e impurezas pueden llegar a afectar considerablemente su desempeño y vida útil. Las rejillas de fibra óptica también son de manejo delicado, pero al estar en contacto con impurezas pueden tratarse con aire a presión, soluciones de alcohol u otros métodos de limpieza y llegar a ser totalmente funcionales de nuevo.

## 6.5 Conclusiones del capítulo 6

A lo largo de este capítulo se presentaron los resultados arrojados por los estudios experimentales y simulados de las rejillas de fibra óptica. En algunos casos, como el de la muestra 1 y 2 hechas de fibra óptica plástica, no se pudieron distinguir visualmente los diferentes órdenes de difracción, sin embargo se podría extender el estudio al localizar los máximos de intensidad por medio de un fotodetector. En algunos casos fue posible observar una mayor intensidad luminosa en el centro de los patrones de difracción, por ejemplo en las muestras 1 y 2 utilizando fuentes láser monocromáticas, sin embargo en el caso de las muestras 3, 4 y 5 el patrón resultante presentaba intensidad uniforme incluso en los órdenes altos.

Se observó que los parámetros de las rejillas especiales tienen diferentes comportamientos dependiendo de la clase de fibra óptica del arreglo y de la fuente láser que se utilice. Se obtuvieron mayores separaciones angulares entre órdenes de difracción en las muestras hechas con fibras ópticas delgadas, aunque en todos los casos se encontraron separaciones de hasta  $1^\circ$ .

Existen aplicaciones que requieren altos órdenes de difracción y las rejillas como las Echelle están optimizadas para concentrar la potencia luminosa en estos órdenes, estas rejillas son además de periodo largo y pueden llegar a trabajar con separaciones angulares cercanas a  $1^\circ$ . Las rejillas de difracción basadas en arreglos de fibra óptica podrían tener futuro en ciertas aplicaciones al igual que las rejillas Echelle, aunque para esto resulta necesario un estudio dedicado a la eficiencia e intensidad luminosa de las rejillas especiales de fibra óptica.

Se mostró que las muestras 3 y 4, arrojan resultados ligeramente distintos entre sí a pesar de estar hechas con fibras del mismo diámetro  $d$ . La muestra 4 presentó separaciones angulares  $\beta$  mayores que la muestra 3, lo cual se atribuye a las características propias de las fibras, como la geometría y el índice de refracción  $n$ , factores que no están incluidos en la ecuación general de rejilla.

Se observó que el parámetro de separación angular  $\beta$  de las rejillas variaba en función de la longitud de onda  $\lambda$ , en donde los valores más grandes de separación entre órdenes se presentaron en las longitudes de onda más altas. El resto de parámetros, como la dispersión angular  $D$ , el Factor  $P$  y la magnificación anamórfica, también presentaron variaciones, ya que dependen directa o indirectamente de la separación angular  $\beta$ .

La dispersión angular  $D$  es un parámetro que aumenta en rejillas hechas con fibra óptica más delgada pero permanece constante al variar la longitud de onda  $\lambda$ . El Factor  $P$  permanece constante al hacer variar la longitud de onda  $\lambda$ . Y la magnificación anamórfica por su parte, muestra una disminución conforme se reduce el diámetro  $d$  de las fibras ópticas utilizadas, además a longitudes de onda más altas, la magnificación anamórfica también disminuye.

Existieron diferencias entre los valores experimentales, simulados y teóricos, que no exceden el 9%, por lo que se puede decir que las ecuaciones de diseño y caracterización para rejillas comerciales comunes son aplicables en las rejillas especiales de fibra óptica, proporcionando buenas aproximaciones al fenómeno de difracción que producen. Se recomienda además, agregar a estas expresiones algunas variables adicionales que incluyan características propias de cada tipo de fibra, como su geometría y tipo de material.

## 6.6 Referencias del capítulo 6

- [1] Newport.com, (2016). *Optical Materials*. [online] Disponible en: <http://www.newport.com/Optical-Materials/144943/1033/content.aspx> [Revisado el 12 Feb. 2016].
- [2] Greenlightsl.com, (2016). *Greenlight Solutions*. [online] Disponible en: <http://www.greenlightsl.com/blog/conoces-los-cristales-opticos-de-fluoruro/> [Revisado el 12 Feb. 2016].
- [3] LTD, K. (2016). *Infrared optics*. [online] Knightoptical.com. Disponible en: <https://www.knightoptical.com/stock/optical-components/infrared-optics/> [Revisado el 12 Feb. 2016].

# CAPÍTULO 7

## Conclusiones Generales

El estudio realizado en la presente tesis tuvo como objetivo principal la adquisición de conocimientos novedosos acerca de rejillas de difracción especiales, hechas con arreglos de fibra óptica y utilizadas en modo de transmisión. Se presentó una revisión general del estado del arte de las rejillas de difracción comerciales más comunes y una descripción de las rejillas de difracción de fibra óptica, proponiendo a estas últimas en esta tesis como solución para separar los componentes espectrales de una fuente de amplio espectro.

Se diseñaron y fabricaron 5 muestras funcionales de rejillas de difracción de arreglos de fibra óptica. La muestra 1 se construyó con fibras plásticas de 1mm de diámetro, la muestra 2 con fibras plásticas de 0.25mm de diámetro, la muestra 3 con fibras ópticas de sílice de tipo multimodo estándar, la muestra 4 con fibras ópticas de sílice tipo monomodo estándar y la muestra 5 con fibra ultra delgada de BK7 de 50 $\mu$ m de diámetro. Para la caracterización de cada rejilla se realizó un estudio teórico así como pruebas experimentales y simulaciones

Se observó que las muestras presentaban un rango de error por alineación del arreglo de fibras, el cual incrementa en las muestras hechas con fibra óptica más delgada. Se observó que debido a los errores de alineación del arreglo de fibras el fenómeno de difracción producido por las rejillas ocasiona que los patrones no tengan una alta nitidez y que la separación entre los órdenes de difracción no sea uniforme.

Se verificaron los parámetros teóricos característicos de separación angular  $\beta$ , dispersión angular  $D$ , Factor  $P$  y magnificación anamórfica por medio de experimentación y simulaciones. En la etapa experimental se realizaron mediciones utilizando un software para procesamiento y análisis de imágenes. Los valores proporcionados de longitud de onda se utilizaron como referencia aproximada para localizar las diferentes franjas de color que constituyen al espectro visible para el caso en donde se utilizó la fuente de supercontinuo.

Se observó y verificó que los parámetros de las rejillas especiales tienen diferentes comportamientos dependiendo de la clase de fibra óptica del que están hechas y de la fuente de luz que se utilice. Se consiguió exitosamente la separación de los diferentes órdenes de difracción y de los diversos componentes espectrales de las fuentes monocromáticas y de la fuente de amplio espectro dentro del rango visible, respectivamente.

La muestra 1 mostró patrones de difracción que no permitieron localizar visualmente los máximos de intensidad de forma experimental, lo mismo sucedió con la muestra 2. Sin embargo, es posible que se puedan localizar los máximos de intensidad con ayuda de elementos de detección como los espectrómetros.

Se visualizaron exitosamente los patrones de difracción de las muestras 3 y 4, en los cuales las franjas de difracción que corresponden a distintos órdenes de difracción son claramente distinguibles y uniformes. La principal diferencia entre la muestra 3 y 4 es que ésta última presentó separaciones angulares mayores a las de la muestra 3 debido a que las fibras SMF y MMF poseen características intrínsecas diferentes entre sí. Por ejemplo la geometría y los índices de refracción de los materiales que componen las fibras SMF y MMF son

diferentes, ocasionando un cambio en la trayectoria de la luz y en los efectos del fenómeno de difracción.

Con la muestra 5 se consiguieron los valores más altos de separación angular. Esta última rejilla experimental mostró además poca simetría en su patrón de difracción al ser utilizada con fuentes monocromáticas y menor nitidez del fenómeno de difracción al utilizar una fuente de amplio espectro. Esto puede estar directamente relacionado al error por alineación del arreglo de fibras que se tuvo en esta muestra, ya que presentó el valor más alto de todas las rejillas fabricadas.

Los valores de **separación angular  $\beta$**  en todos los casos fueron menores a  $1^\circ$  y se comprobó que este parámetro varía en función de la geometría de las fibras y de la longitud de onda. La separación angular  $\beta$  incrementó en rejillas hechas con fibra óptica más delgada y al usar longitudes de onda mayores.

La **dispersión angular  $D$**  también aumentó al hacer disminuir el diámetro  $d$  de las fibras ópticas utilizadas, pero se mantuvo casi constante al hacer variar la longitud de onda. Los valores más grandes de dispersión  $D$  se alcanzaron con las rejillas de fibra óptica más delgada, un comportamiento similar al de la separación angular.

Por otra parte el **Factor  $P$**  incrementó en las rejillas hechas con fibra óptica de diámetros  $d$  más grandes y se mantuvo estable al hacer variar la longitud de onda. Se tuvieron los valores más bajos de este parámetro al utilizar las muestras hechas de fibra óptica más delgada.

Finalmente la **magnificación anamórfica** disminuyó conforme se redujo el diámetro  $d$  de las fibras ópticas utilizadas. Esto quiere decir que al utilizar fibras ópticas más delgadas en las rejillas, se consigue un haz de luz difractado cada vez más estrecho respecto al haz incidente, pudiéndose notar además que a longitudes de onda más grandes la magnificación anamórfica disminuye y los rayos difractados son cada vez más estrechos.

Existieron diferencias entre los valores experimentales y simuladas respecto a los teóricos, las cuales no exceden del 9%, por lo que se puede decir que las ecuaciones de diseño y caracterización para rejillas comerciales son aplicables en las rejillas especiales de fibra óptica, proporcionando buenas aproximaciones al fenómeno de difracción que producen. Se recomienda agregar a estas expresiones algunas variables adicionales que incluyan las características propias de cada tipo de fibra, como su geometría y tipo de material.

El comportamiento de las rejillas de fibra óptica podría compararse al de las rejillas Echelle, las cuales son rejillas de periodo largo que ofrecen separaciones angulares cercanas a  $1^\circ$ . Sin embargo resulta necesario un estudio dedicado a la eficiencia de las rejillas de fibra óptica para conocer a fondo su campo de aplicación.

En conclusión, las rejillas de difracción de fibra óptica pueden ser utilizadas para separar los componentes espectrales de una fuente de amplio espectro, y para separar un haz monocromático en diferentes órdenes de difracción. En este trabajo, dichas propiedades fueron estudiadas y comprobadas en la banda visible, por las limitaciones de equipo de laboratorio disponible para este estudio. Para extender el estudio experimental a la banda infrarroja hasta las ondas más largas de SC, se requiere de los detectores de la radiación de la banda infrarroja y las fibras ópticas y lentes de materiales transparentes hasta la longitud de onda de  $2.4 \mu\text{m}$ .

## ANEXO A

### A.1 Espectros de transmisión de materiales

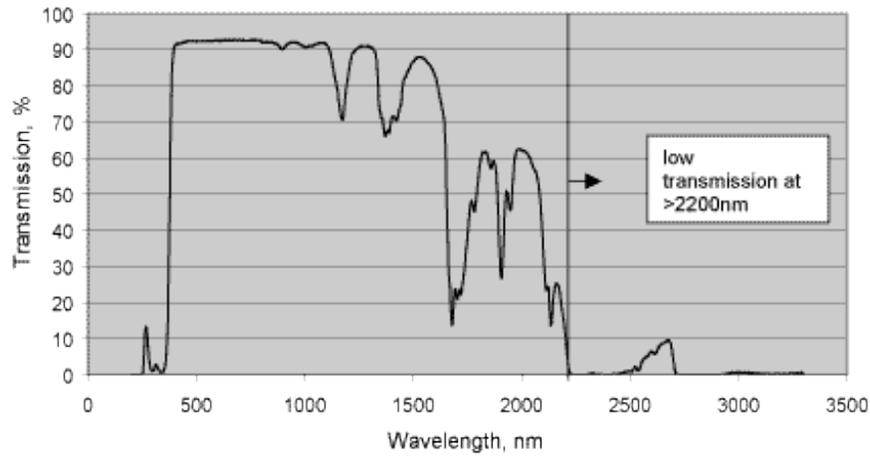


Figura A.1. Espectro de transmisión del PMMA [1].

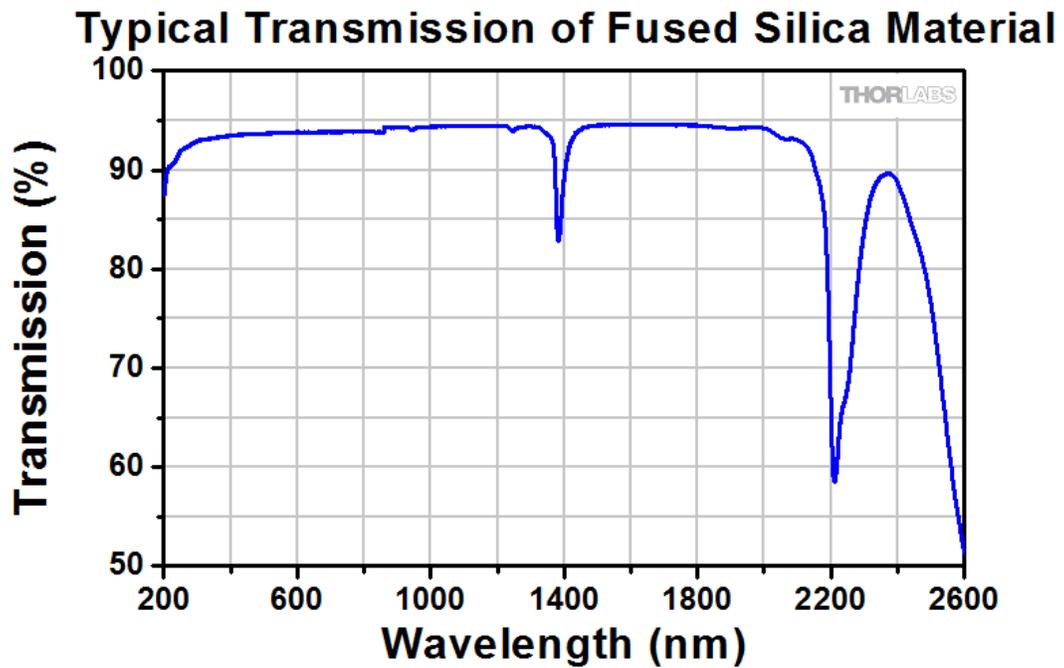


Figura A.2. Espectro de transmisión del sílice [2].

## Borosilicate Glass Transmission (2 mm Thick)

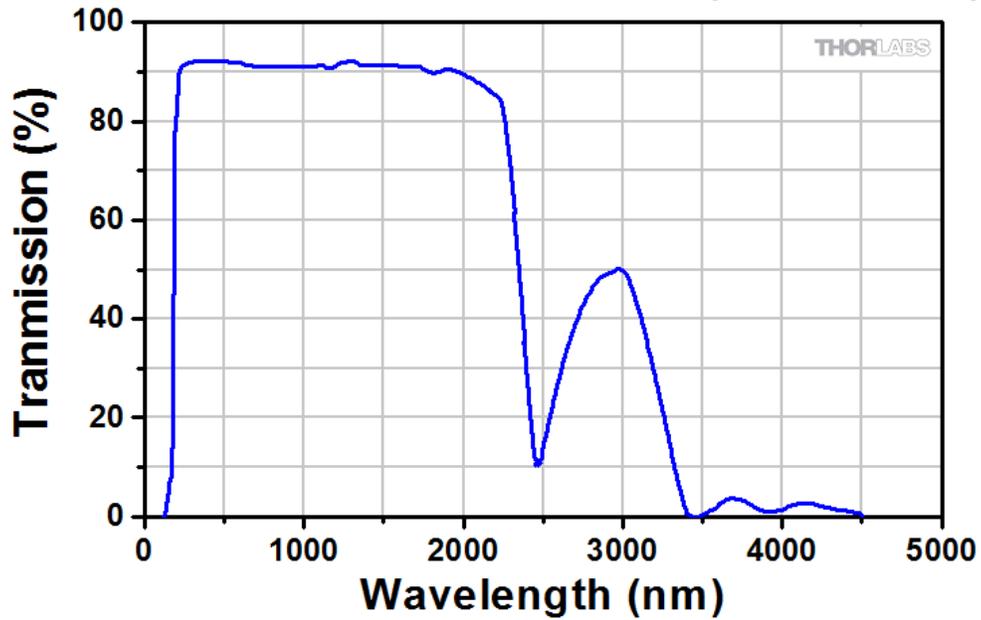


Figura A.3. Espectro de transmisión del borosilicato [3].

## A.2 Gráficos de atenuación de fibra óptica

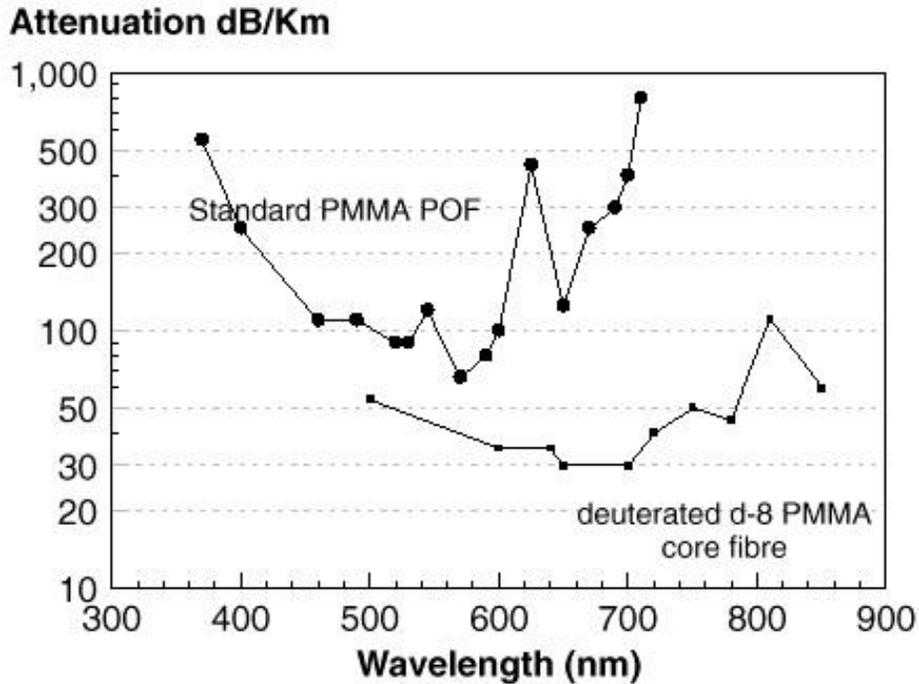


Figura A.4. Gráfico de atenuación de fibras ópticas plásticas estándar [4].

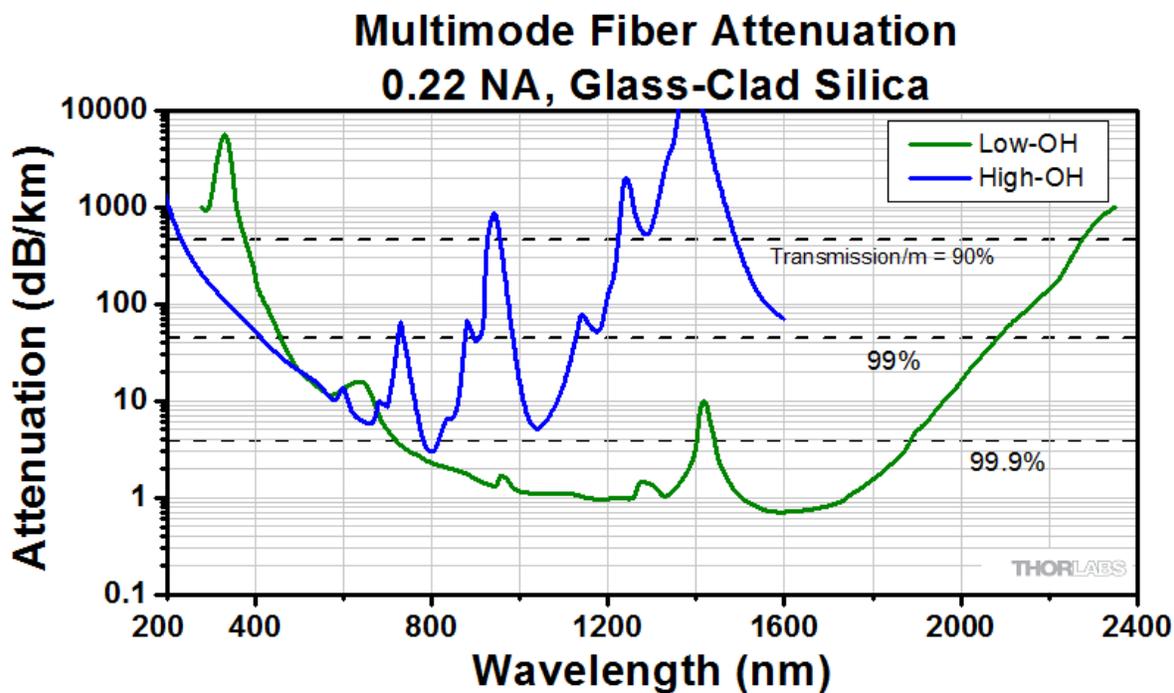


Figura A.5. Gráfico de atenuación de fibras ópticas multimodo estándar [5].

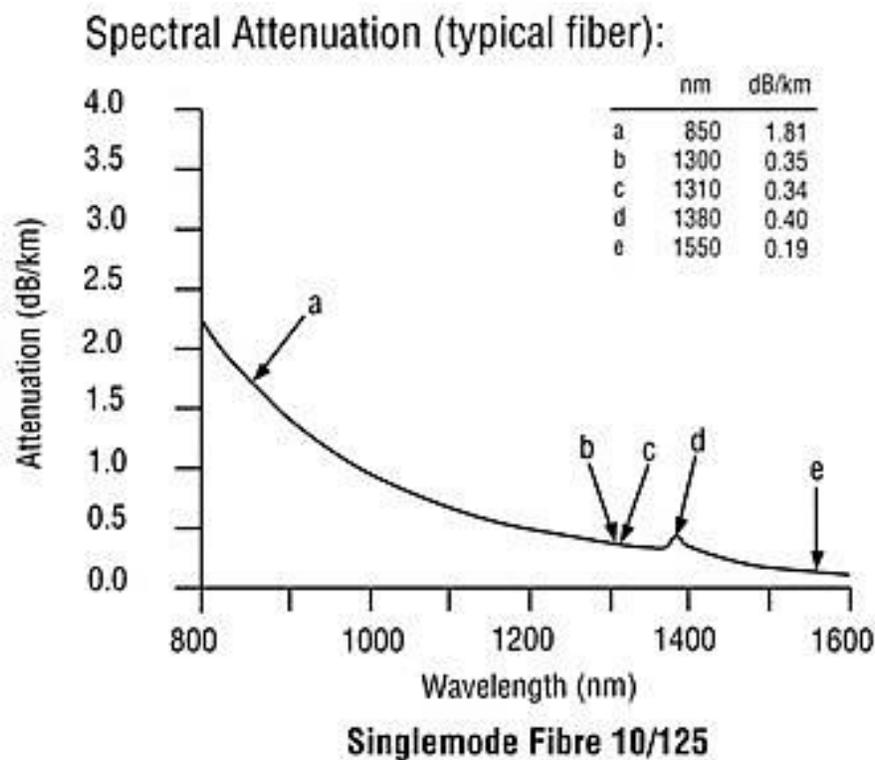


Figura A.6. Gráfico de atenuación de fibras ópticas monomodo estándar [6].

# Borosilicate Glass Fibers

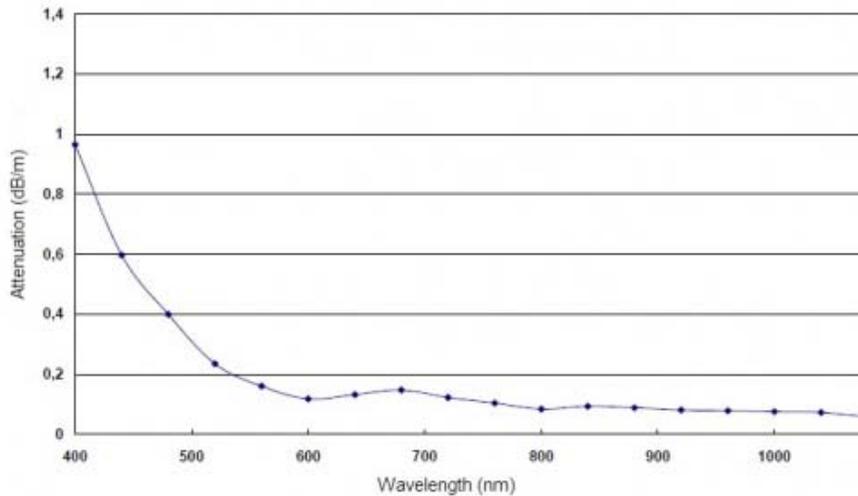


Figura A.7. Gráfico de atenuación de fibras ópticas de borosilicato estándar [7].

## A.3 Referencias del Anexo A

- [1] Twi-global.com,. (2015). *Process monitoring methods in laser welding of plastics (April 2006)*. Revisado el: 11 Noviembre 2015, disponible en: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/process-monitoring-methods-in-laser-welding-of-plastics-april-2006/>
- [2] Thorlabs.com,. (2015). Revisado el: 11 Noviembre 2015, disponible en: [https://www.thorlabs.com/images/TabImages/FusedSilica\\_Transmission2\\_780.gif](https://www.thorlabs.com/images/TabImages/FusedSilica_Transmission2_780.gif)
- [3] Thorlabs.com,. (2015). Revisado el: 11 Noviembre 2015, disponible en: [https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Borosilicate\\_Glass\\_Transmission\\_A1\\_780.gif](https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Borosilicate_Glass_Transmission_A1_780.gif)
- [4] Imedeia.uib-csic.es, (2015). *Understanding Optical Communications:Optical Fibre*. [online] Disponible en: [http://imedeia.uib-csic.es/~salvador/coms\\_optiques/addicional/ibm/ch02/02-21.html](http://imedeia.uib-csic.es/~salvador/coms_optiques/addicional/ibm/ch02/02-21.html) [Revisado el: 11 Noviembre 2015].
- [5] Thorlabs.com, (2015). *0.22 NA Silica Core, Glass Clad Multimode Optical Fiber, Step Index*. [online] Disponible en: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=6838](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6838) [Revisado el: 11 Noviembre 2015].
- [6] Kingfisherfiber.com, (2015). *Optical Loss Testing Concepts Application Note*. [online] Disponible en: <http://www.kingfisherfiber.com/Application-Notes/02-Optical-Loss-Test-Concepts.htm> [Revisado el: 11 Noviembre 2015].
- [7] Fibertech-optica.com, (2015). *Borosilicate Glass Fibers | Fibertech Optica*. [online] Disponible en: <https://fibertech-optica.com/assemblies-options/borosilicate-glass-fibers/> [Revisado el: 11 Noviembre 2015].

## ANEXO B

### B.1 Gráficos Teóricos

#### B.1.1 Fuentes Monocromáticas

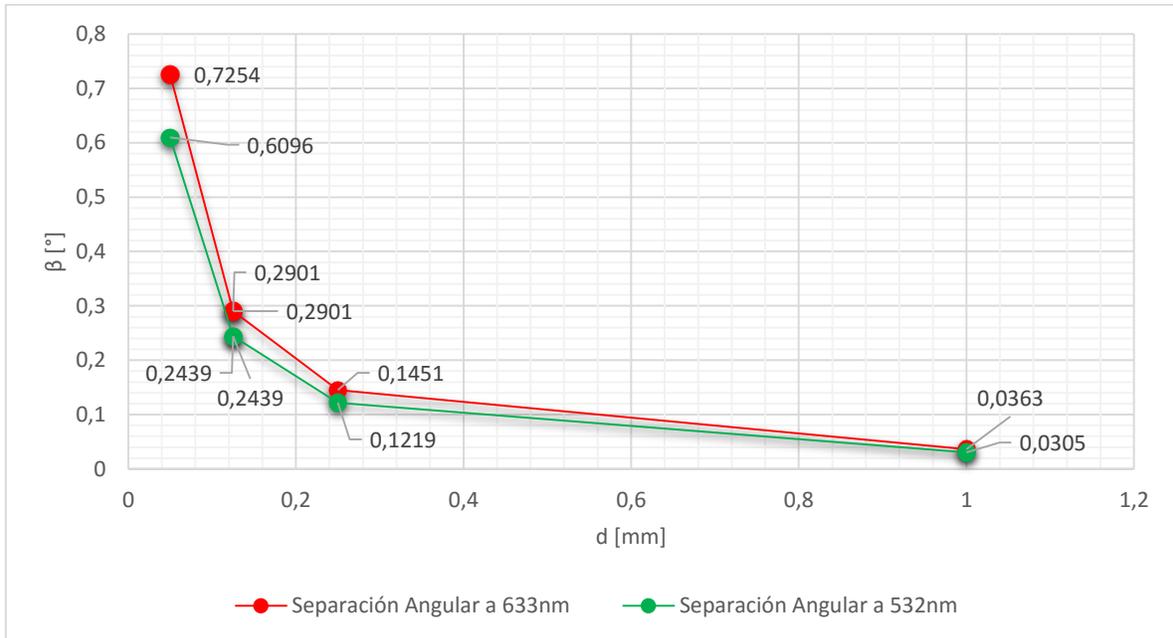


Figura B.1. Separación angular  $\beta$  teórica vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

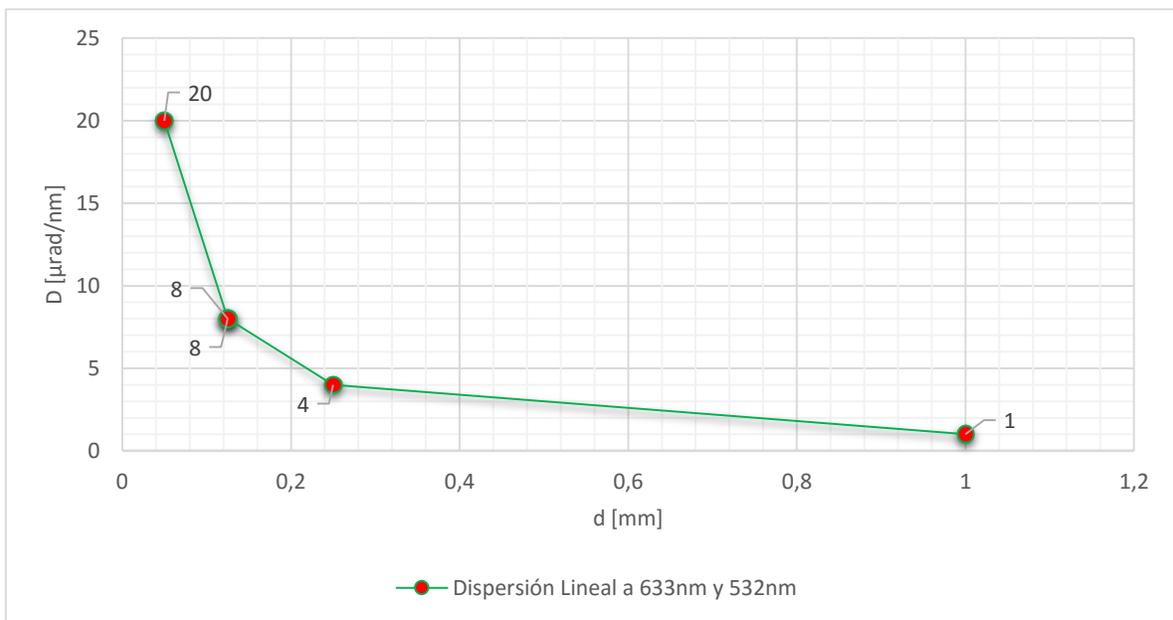


Figura B.2. Dispersión angular  $D$  teórica vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

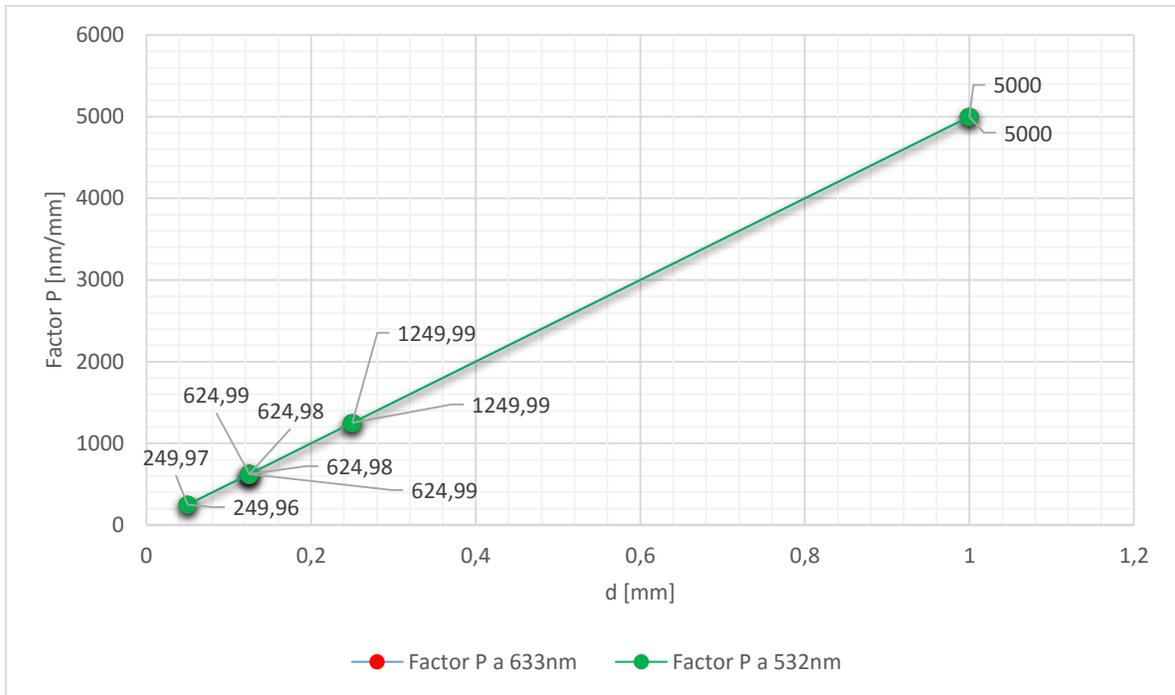


Figura B.3. Factor  $P$  teórico vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

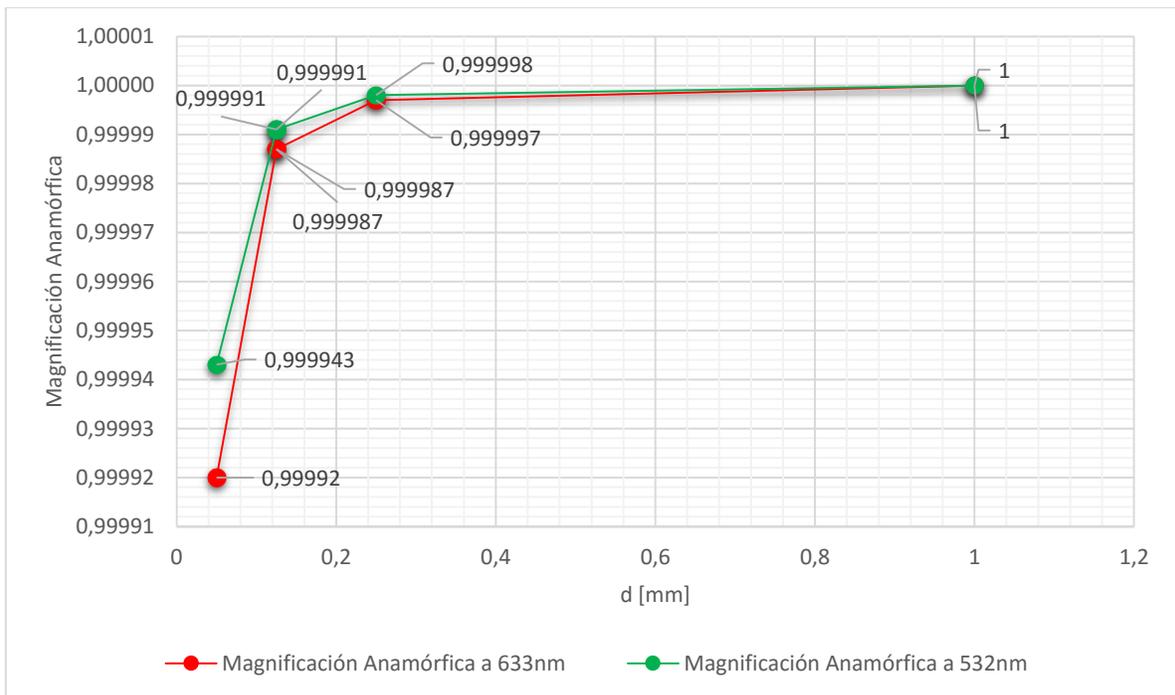


Figura B.4. Magnificación anamórfica teórica vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

### B.1.2 Fuente de amplio espectro

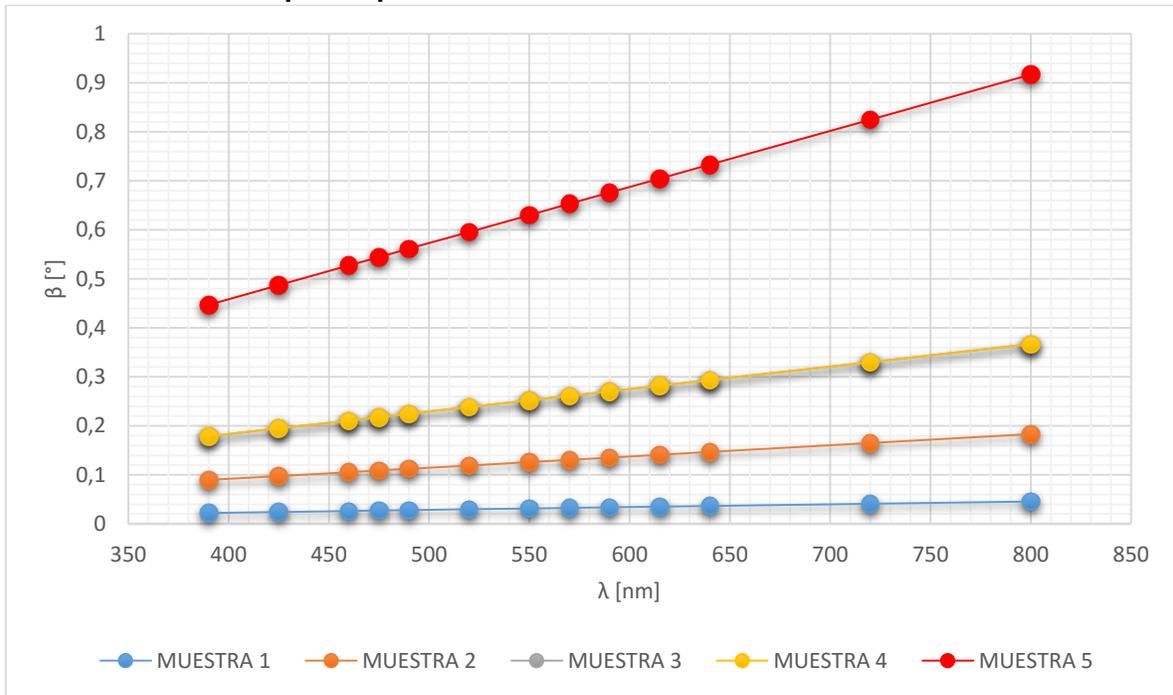


Figura B.5. Separación angular  $\beta$  teórica vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

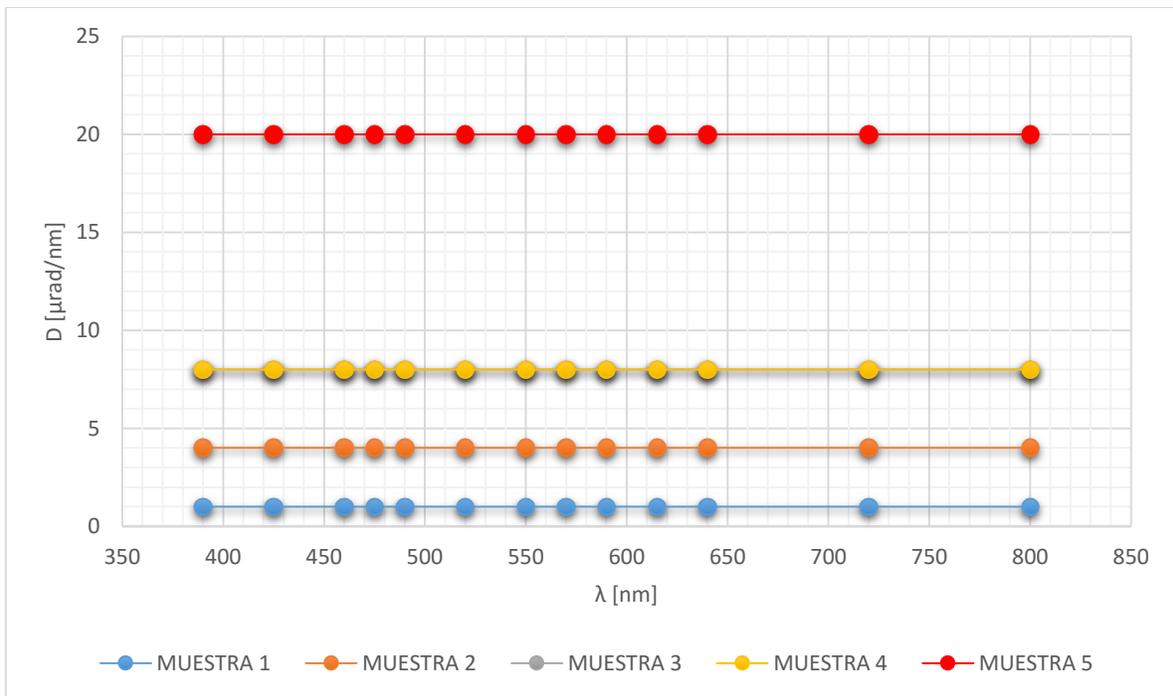


Figura B.6. Dispersión angular  $D$  teórica vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

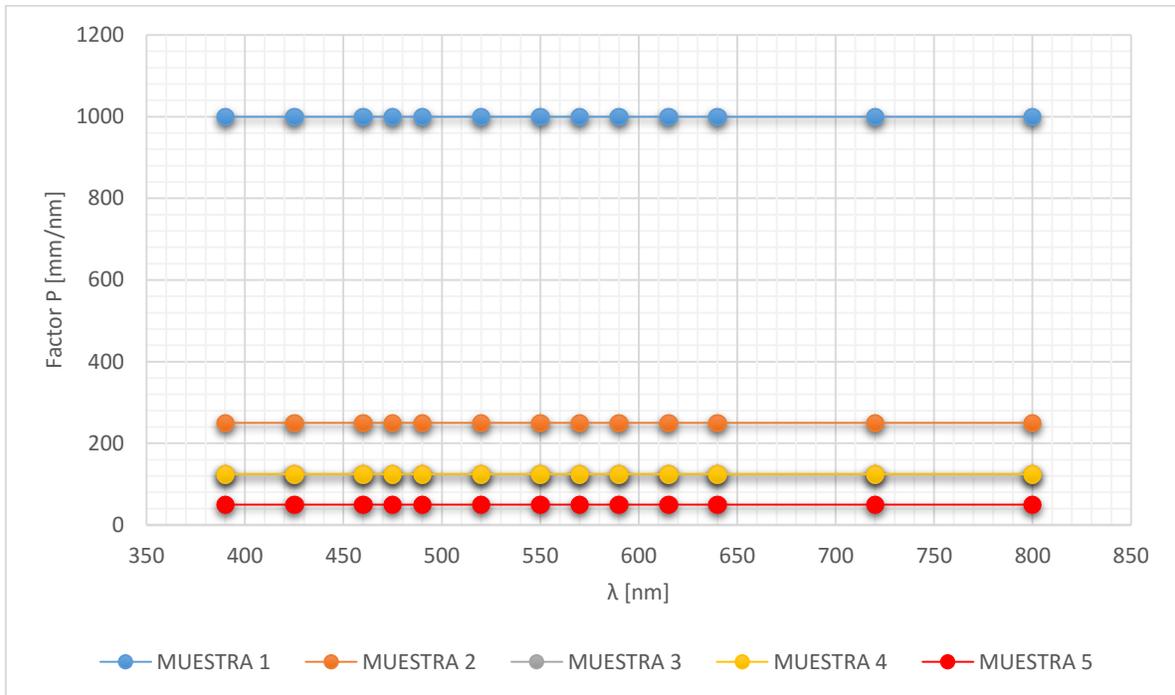


Figura B.7. Factor  $P$  teórico vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

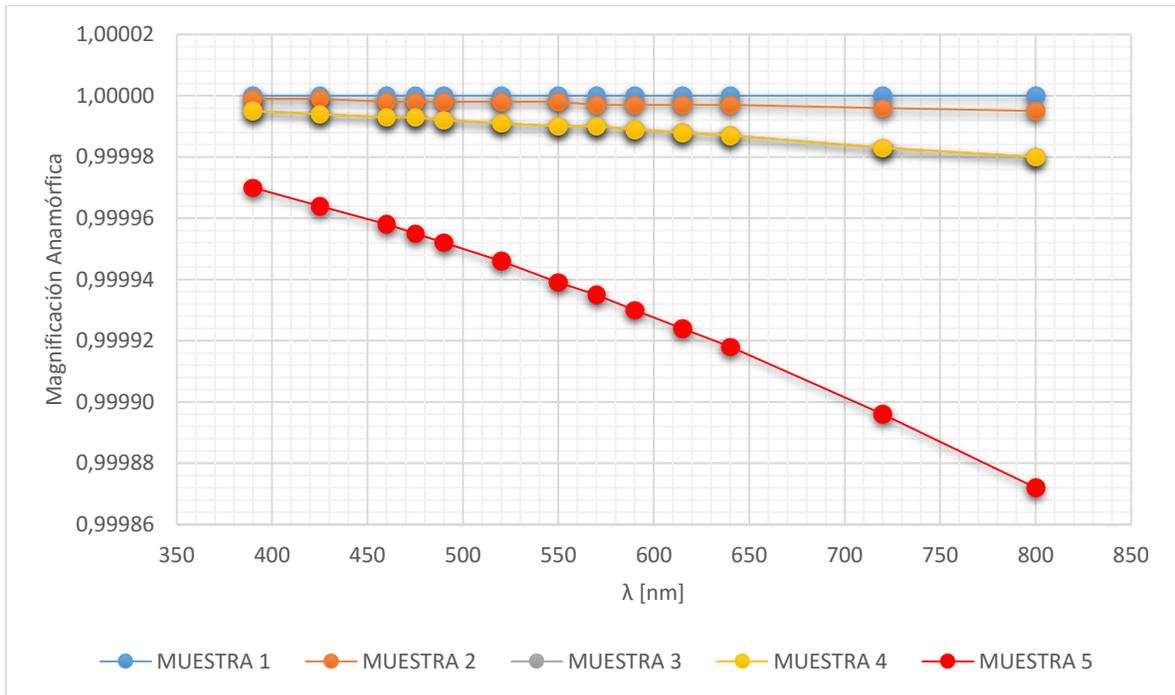


Figura B.8. Magnificación anamórfica teórica vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

## B.2 Gráficos Experimentales

### B.2.1 Fuentes Monocromáticas

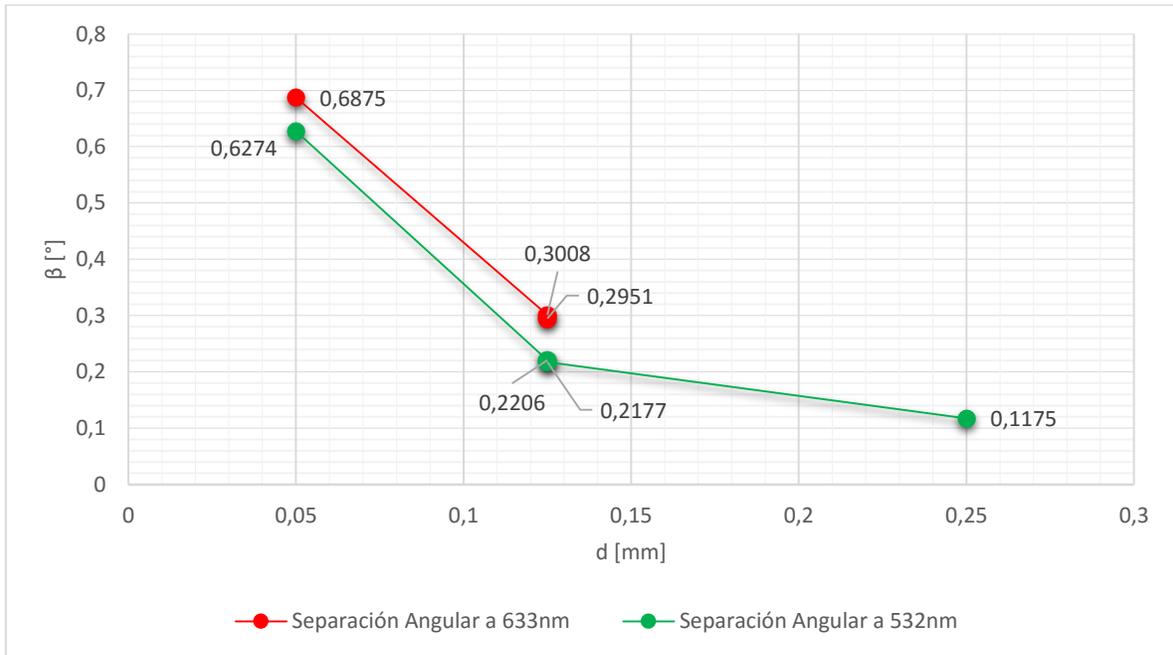


Figura B.9. Separación angular  $\beta$  experimental vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

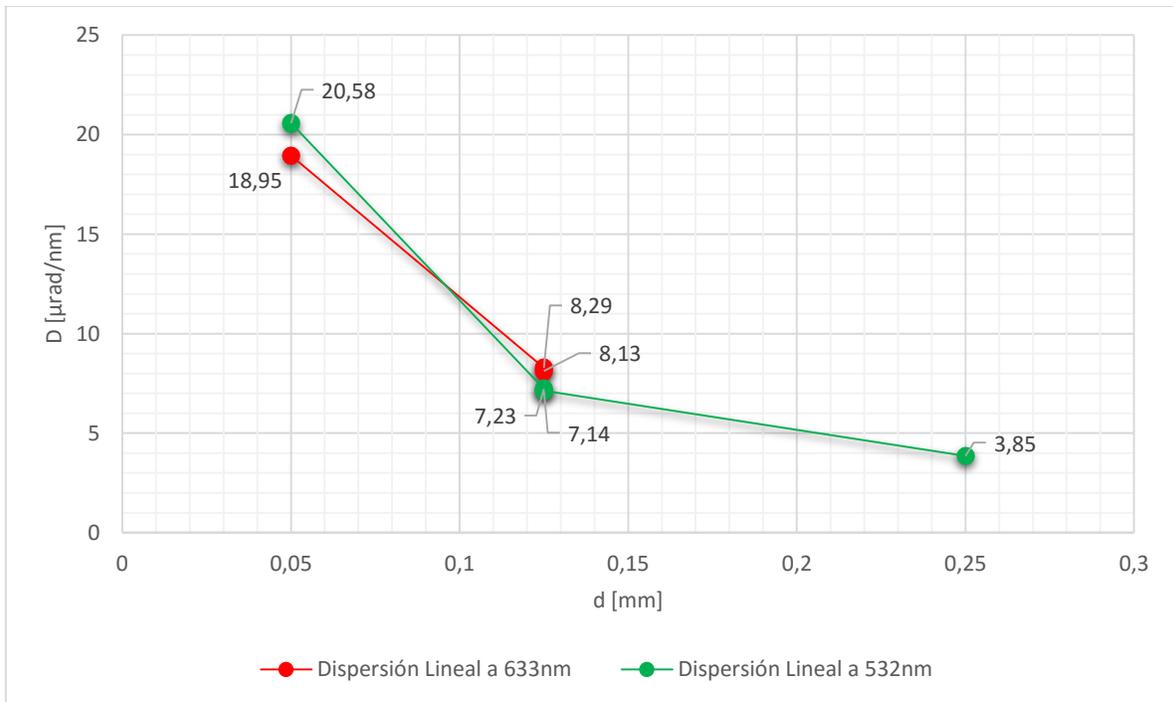


Figura B.10. Dispersión angular  $D$  experimental vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

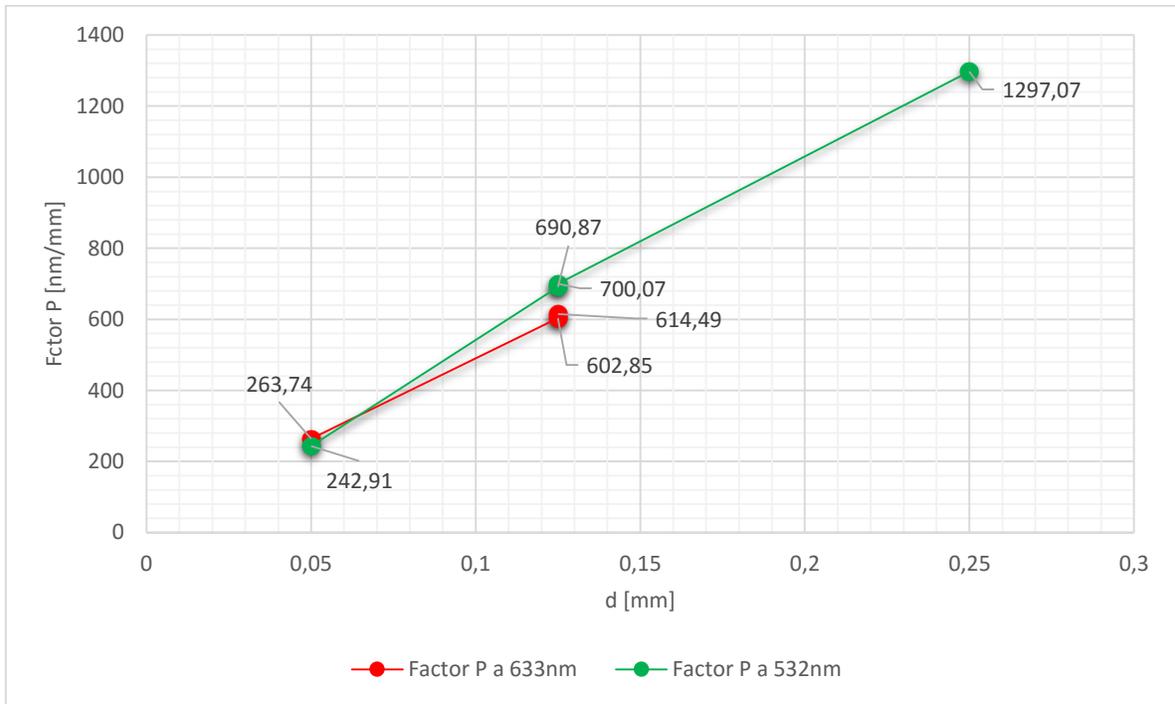


Figura B.11. Factor  $P$  experimental vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

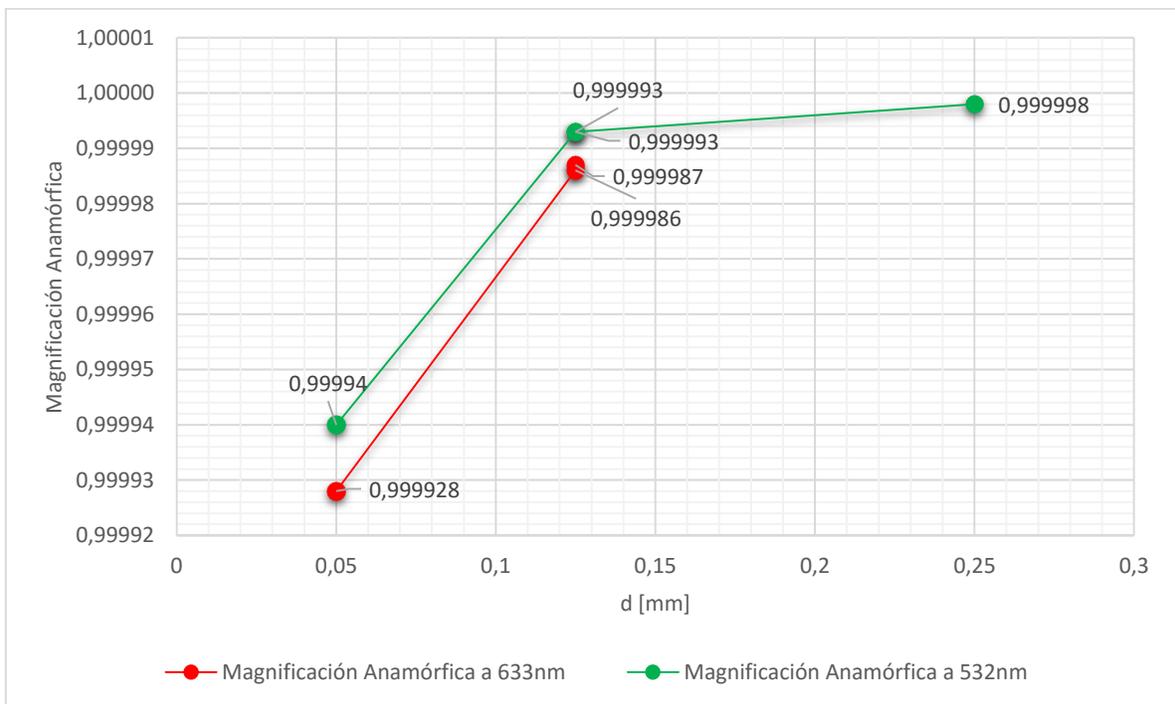


Figura B.12. Magnificación anamórfica experimental vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

## B.2.2 Fuente de amplio espectro

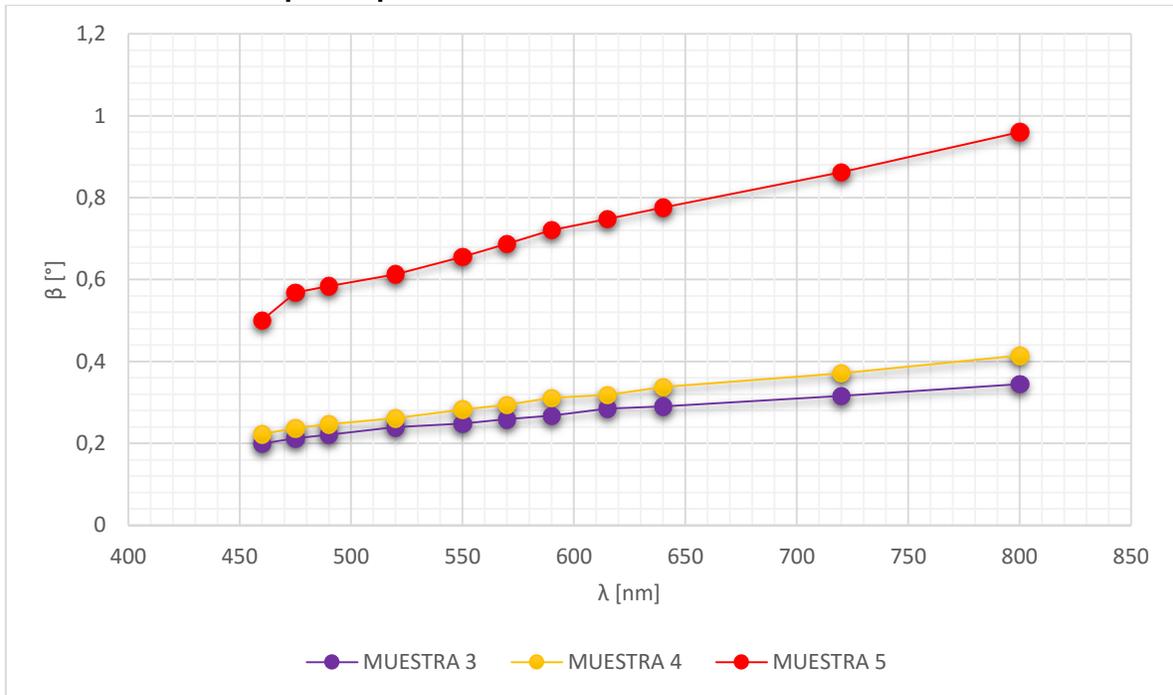


Figura B.13. Separación angular  $\beta$  experimental vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

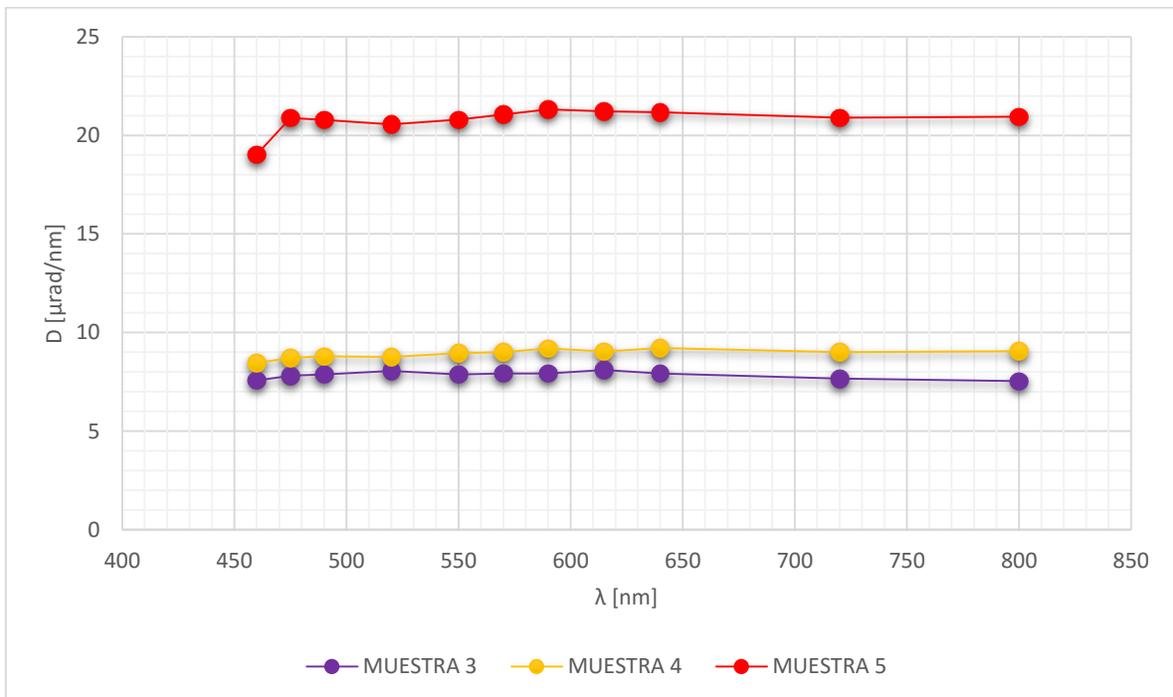


Figura B.14. Dispersión angular  $D$  experimental vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

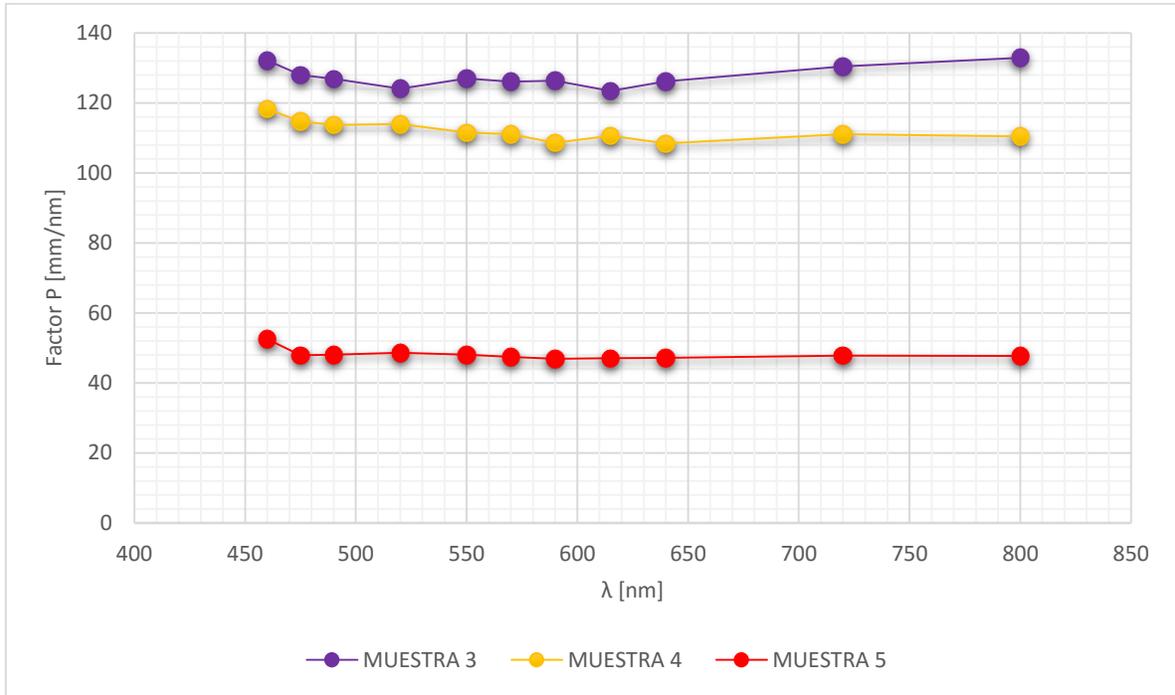


Figura B.15. Factor  $P$  experimental vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

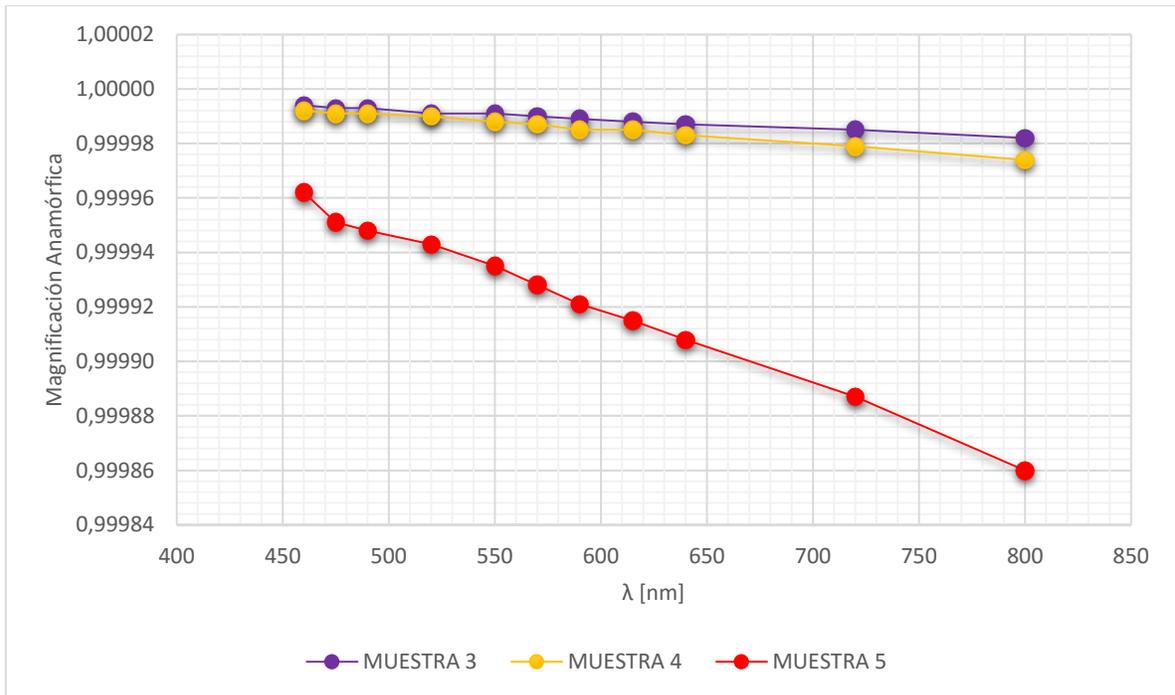


Figura B.16. Magnificación anamórfica experimental vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente amplio espectro.

## B.3 Gráficos de Simulación

### B.3.1 Fuentes Monocromáticas

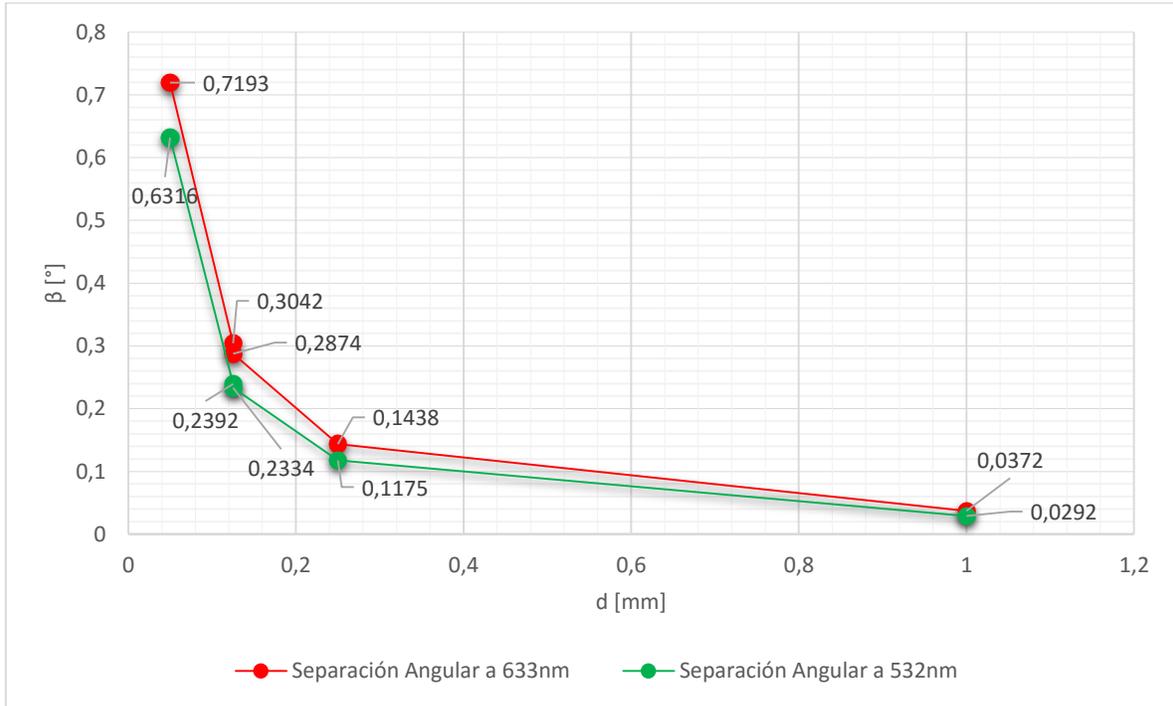


Figura B.17. Separación angular  $\beta$  simulada vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

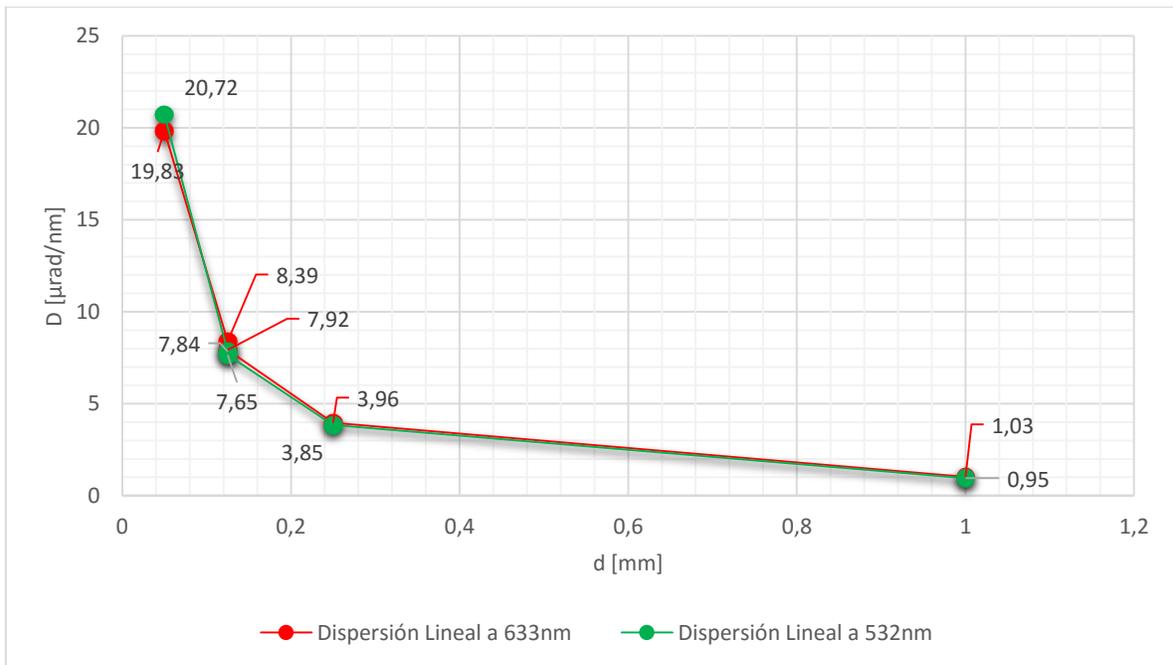


Figura B.18. Dispersión angular  $D$  simulada vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

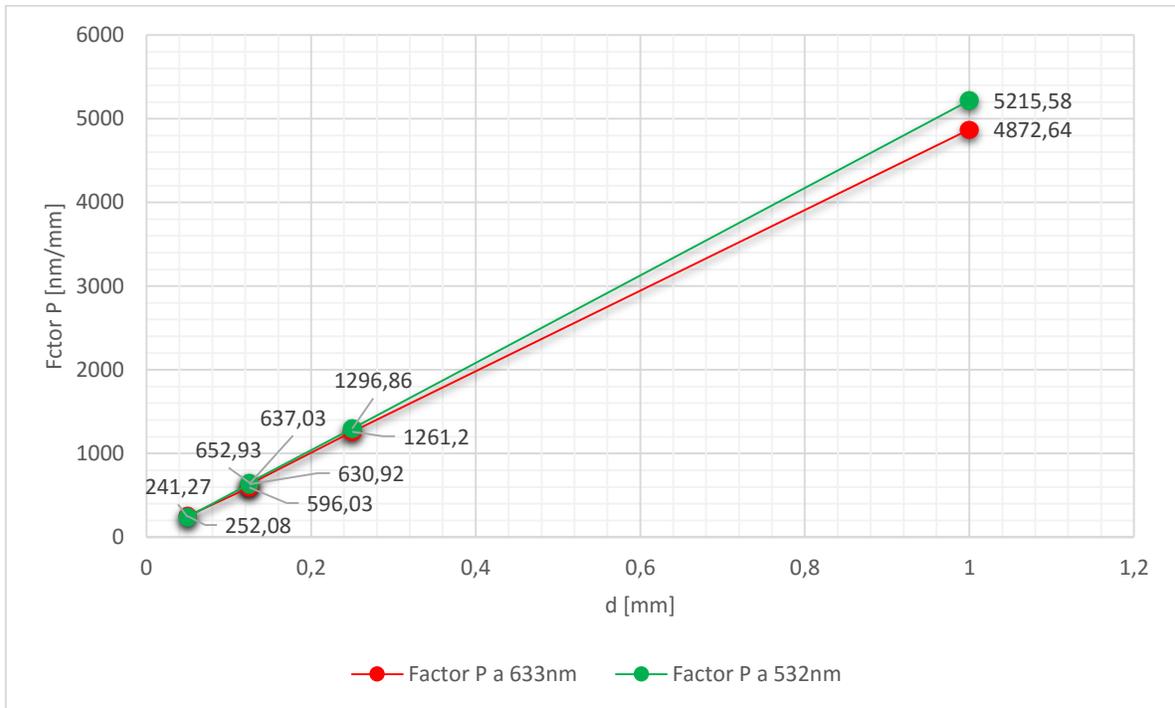


Figura B.19. Factor  $P$  simulado vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

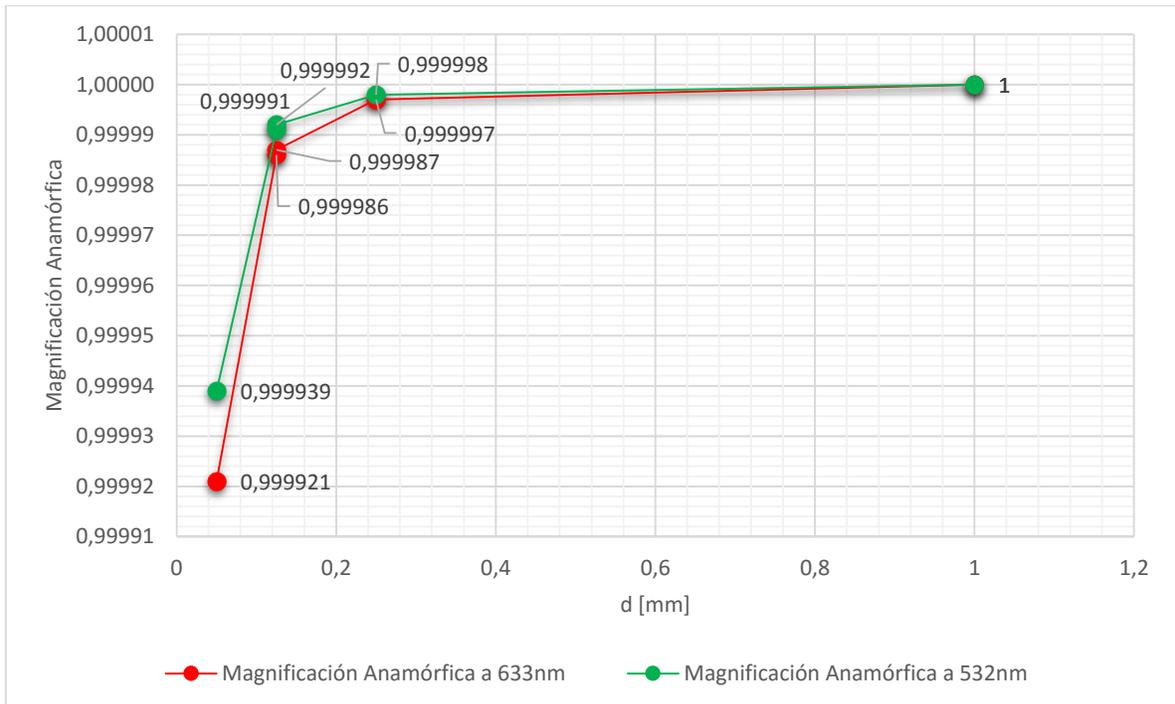


Figura B.20. Magnificación anamórfica simulada vs diámetro de las fibras  $d$  usando fuentes láser monocromáticas.

### B.3.2 Fuente de amplio espectro

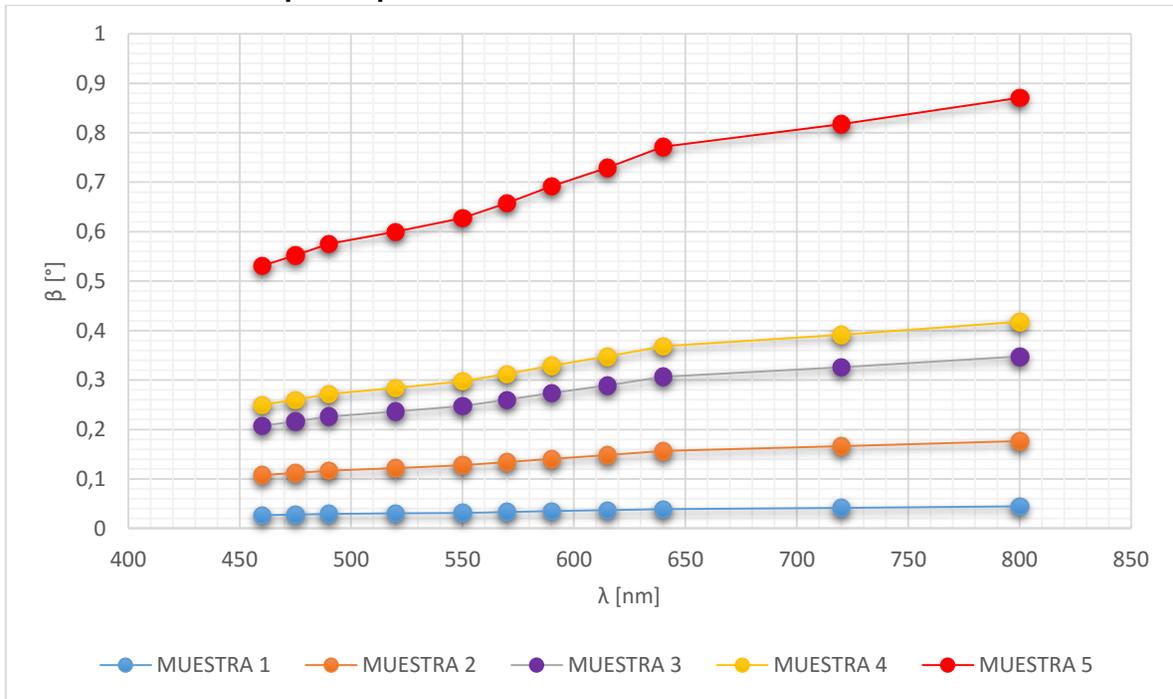


Figura B.21. Separación angular  $\beta$  simulada vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

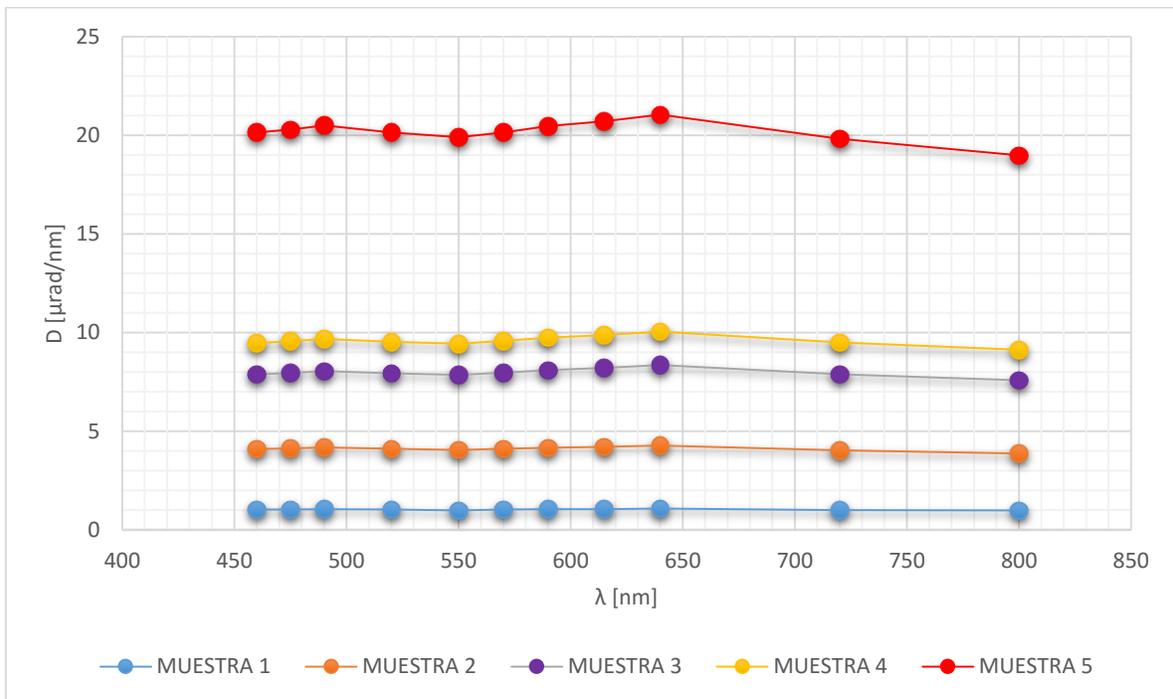


Figura B.22. Dispersión angular  $D$  simulada vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

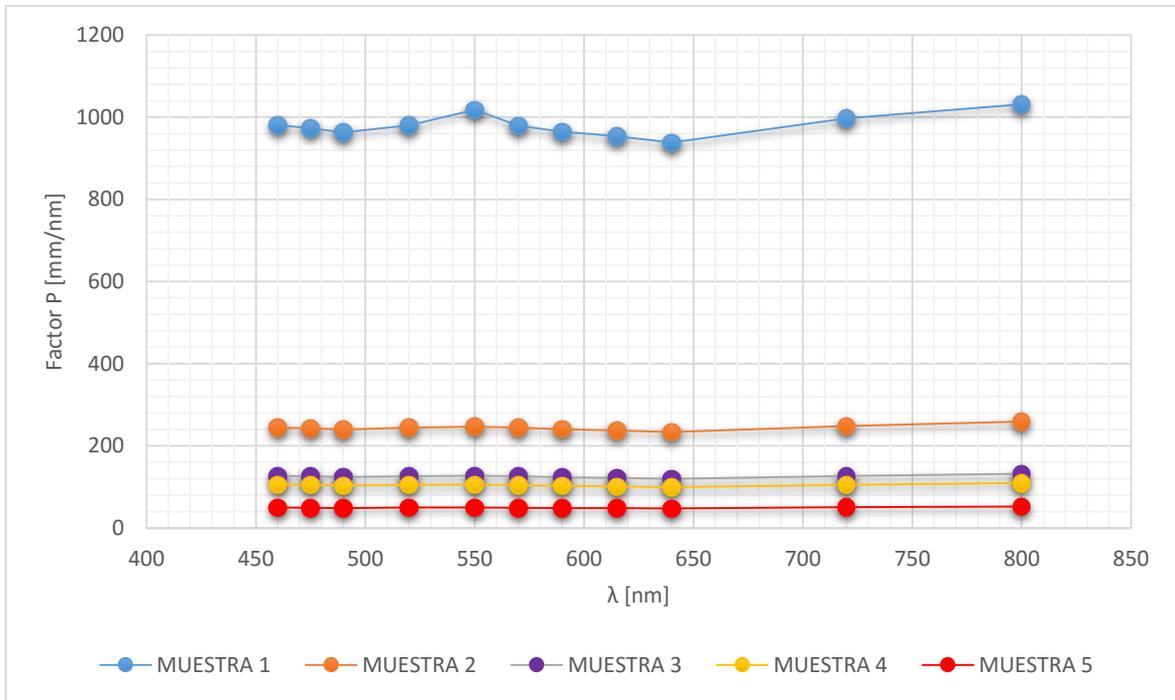


Figura B.23. Factor  $P$  simulado vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.

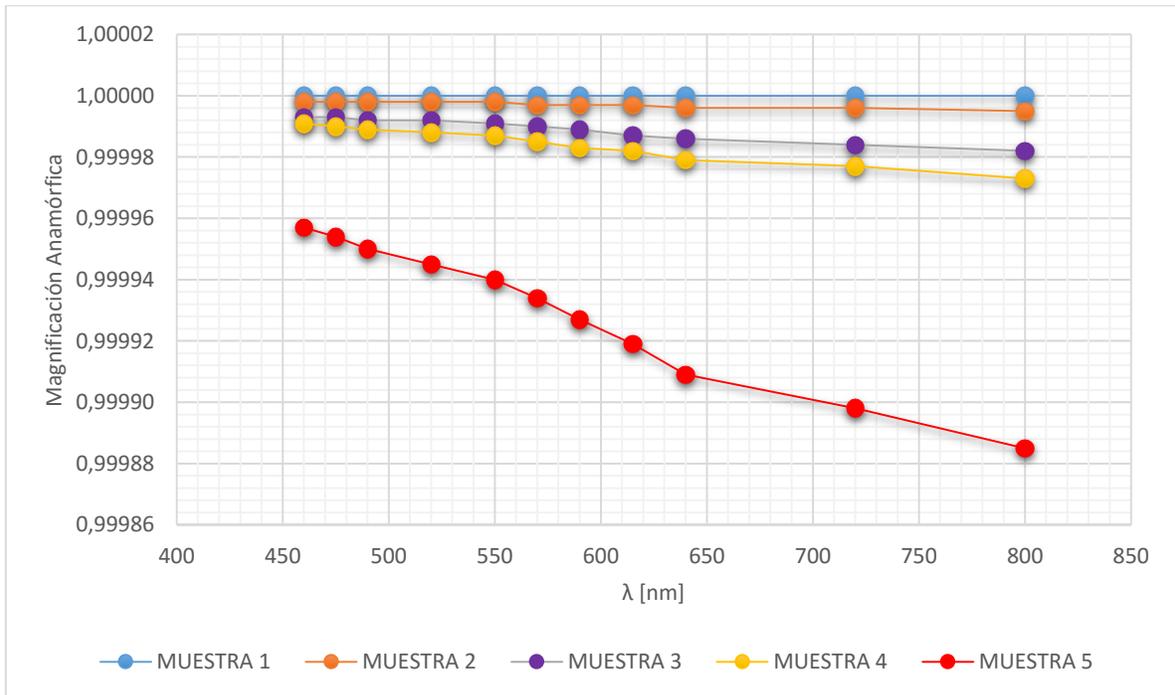


Figura B.24. Magnificación anamórfica simulada vs longitud de onda  $\lambda$ , usando fuente de amplio espectro.