

**ESTUDIO DE PATRONES DE  
INTERFERENCIA-DIFRACCIÓN GENERADOS POR  
ABERTURAS ILUMINADAS CON DISTINTAS  
ESTRUCTURAS DE ILUMINACIÓN**

Adriana Cabra Maza

**Trabajo de Investigación para optar al título de Magíster en Física**

Director: Dr. Rodrigo Henao



Universidad de Antioquia  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Instituto de Física  
Medellín  
Octubre de 2023



# Agradecimientos

Deseo reservar este espacio para agradecer inicialmente a Dios por permitirme estar en un proceso de crecimiento científico y brindarme la sabiduría necesaria para enfrentar obstáculos.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi director, el Dr Rodrigo Henao, por sus buenos consejos, su aporte de ideas y por todo lo que me permitió aprender en este largo proceso. También a mis compañeros, por todos los momentos compartidos y los ratos en los que me daban un poco de su tiempo y paciencia para aclarar dudas.

En tercer lugar, quiero agradecer a mi esposo, a mi hijo y a toda mi hermosa familia ya que sin ustedes no sería la mujer crítica que busca seguir sus sueños.

Finalmente, te agradezco a ti que ya no estas... porque todo el amor que sembraste en mi, me transformó en lo que ahora soy.

*El amor nunca se da por vencido, jamás pierde la fe, siempre tiene esperanzas y se mantiene firme en toda circunstancia. -1 Corintios 13:7-.*

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>II</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>VII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Principios de la Teoría de Difracción . . . . .	4
2.1.1. Principio de Huygens-Fresnel para coordenadas rectangulares . .	4
2.1.2. Aproximación de Fresnel . . . . .	5
2.1.3. Número de zonas de Fresnel . . . . .	7
2.1.4. Aproximación de Fraunhofer . . . . .	9
2.2. Fenómeno de Speckle . . . . .	10
2.2.1. Tamaño del speckle . . . . .	14
2.2.2. Distribución del brillo . . . . .	15
2.3. Almacenamiento de datos con la orientación del speckle . . . . .	16
2.4. Speckle generado por una fibra óptica multimodo . . . . .	17
<b>3. Montaje experimental</b>	<b>21</b>
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>26</b>
4.1. Patrones de interferencia-difracción generados por aberturas circulares . . . . .	28
4.2. Patrones de interferencia-difracción generados por aberturas cuadradas . . . . .	32
4.3. Patrones de interferencia-difracción generados por un par de rendijas . . . . .	34
<b>5. Conclusiones</b>	<b>38</b>

*ÍNDICE GENERAL*

III

**Bibliografía**

**44**

# Índice de Figuras

1.1. Patrón de interferencia-difracción por una par de rendijas con un ancho y una separación igual a 0.3 mm (este patrón se registró a 20.0 mm de las aberturas respecto a la cámara y la distancia entre la fuente de luz y el par de aberturas fue 1.0 mm). . . . .	2
2.1. Plano de abertura y plano de observación separados una distancia $z$ . Tomado de la referencia [7]. . . . .	4
2.2. La estructura total es reemplazada por una abertura equivalente de radio $R$ , que corresponde al círculo que circunscribe la estructura compleja. Cada abertura individual tiene radio $r$ . . . . .	8
2.3. Patrón de Speckle generado por un difusor. . . . .	11
2.4. Sistema de formación del speckle objetivo. . . . .	12
2.5. Sistema de formación del speckle subjetivo. . . . .	12
2.6. Suma de fasores [14]. . . . .	13
2.7. Función densidad de probabilidad de la intensidad para un campo aleatorio [14]. . . . .	15
2.8. Speckle orientado debido a una rendija [14]. . . . .	16
2.9. Speckle orientado debido a una doble abertura circular [14]. . . . .	17
2.10. Speckle generado por una fibra óptica multimodo. . . . .	18
2.11. Interferencia de modos que se propagan en el interior de una fibra óptica. $n_1$ y $n_2$ son los índices de refracción del núcleo de la fibra y de su recubrimiento respectivamente. Además, $\Delta x$ es el tamaño del speckle [15].	19
2.12. Función densidad de probabilidad del speckle generado por (a) una fibra de índice escalonado y (b) una fibra de índice gradual. Se tuvieron en cuenta 4 fibras con diferentes longitudes [15]. . . . .	20
3.1. Montaje experimental donde se utiliza la fibra óptica multimodo como generadora del frente de onda incidente sobre las aberturas. . . . .	21
3.2. Máscaras usadas en el montaje experimental: (a) Máscara con aberturas circulares de igual radio, (b) Máscara con aberturas cuadradas de igual ancho y (c) Máscara con doble rendija de igual ancho. . . . .	22

3.3. Parámetros de la simulación. Los parámetros radio, $a$ y $b$ se modificaban al cambiar de abertura, haciendo coincidir estos valores con los valores geométricos reales. . . . .	23
3.4. La imagen de la izquierda corresponde al patrón de speckle generado por un vidrio despulido, y la imagen de la derecha es la gráfica normalizada del número de píxeles ( $N_P$ ) Vs la intensidad ( $I$ : $0 \rightarrow 100$ , donde 0 representa el color negro y 100 el color blanco) de la imagen de la izquierda. . . . .	24
3.5. Patrón de speckle generado por la fibra óptica multimodo marca MAXELL e histograma de la distribución de intensidad. . . . .	24
4.1. Acercamiento de la zona central de los patrones de speckle generados por la fibra óptica multimodo para una doble abertura circular, doble abertura cuadrada y doble rendija (de izquierda a derecha). . . . .	36
5.1. <b>Una rendija:</b> Patrón de interferencia-difracción generado por una rendija a una distancia $b = 20.0$ mm respecto a la estructura difractiva. Ancho de la rendija = $0.2$ mm. . . . .	40
5.2. <b>Doble rendija:</b> Patrón de interferencia-difracción generado por una doble rendija a una distancia $b = 20.0$ mm respecto a la estructura difractiva. Ancho de las rendijas = $0.02$ mm, separación entre las rendijas = $0.03$ mm. . . . .	41
5.3. <b>Rejilla:</b> Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia $b = 20.0$ mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas. . . . .	41
5.4. <b>Rejilla:</b> Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia $b = 20.0$ mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas. . . . .	42
5.5. <b>Rejilla:</b> Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia $b = 60.0$ mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas. . . . .	42
5.6. <b>Rejilla:</b> Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia $b = 100.0$ mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas. . . . .	43

# Índice de Tablas

4.1. Valores obtenidos de $N_i$ y $N_e$ para las aberturas circulares. Todos los valores encontrados indican que el plano de observación se encuentra en el campo cercano o de Fresnel, a excepción del valor $N_i$ para el primer par de aberturas circulares que indica que el plano de observación se encuentra en la zona de transición para la onda plano, el vidrio esmerilado y la fibra óptica. D y S corresponden al ancho y la separación entre las aberturas respectivamente. . . . .	30
4.2. Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de aberturas circulares. El diámetro y separación de cada abertura circular fue respectivamente: Fila 1 →(0.2 mm y 0.2 mm), Fila 2→(0.4 mm y 0.4 mm) y Fila 3→(0.6 mm y 0.5 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara. Las imágenes del vidrio esmerilado para las dos primeras aberturas no se reportaron ya que la intensidad del campo sobre la CCD era muy tenue para ser captada. . . . .	31
4.3. Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de aberturas circulares. El diámetro y separación de cada abertura circular fue respectivamente de: Fila 1→(0.8 mm y 0.5 mm) y Fila 2→(1.1 mm y 0.6 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara. . . . .	32
4.4. Valores obtenidos de $N_i$ y $N_e$ para las máscaras con las aberturas cuadradas. Todos los valores encontrados indican que el plano de observación se encuentra en el campo cercano o de Fresnel. D y S corresponden al ancho y la separación entre las aberturas respectivamente. . . . .	33

4.5. Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de aberturas cuadradas. El ancho y separación de cada abertura fue respectivamente de: Fila 1 →(1.2 mm y 2.0 mm) y Fila 2→(1.2 mm y 2.5 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara. . . . . 34

4.6. Valores obtenidos de  $N_i$  y  $N_e$  para las máscaras con las rendijas. Todos los valores encontrados indican que el plano de observación se encuentra en el campo cercano o de Fresnel, a excepción del valor  $N_i$  que indica que el plano de observación se encuentra en la zona de transición para la onda plano en los tres pares de rendijas. D y S corresponden al ancho y la separación entre las aberturas respectivamente. . . . . 35

4.7. Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de rendijas. El ancho y separación de cada rendija fue respectivamente de: Fila 1→(0.1 mm y 0.15 mm), Fila 2→(0.1 mm y 0.175 mm) y Fila 3→(0.1 mm y 0.2 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara . . . . . 37

# Capítulo 1

## Introducción

Cuando un sistema óptico es iluminado con luz altamente coherente, los fenómenos tales como interferencia y difracción en el espacio libre cobran importancia, debido a que estos se pueden observar claramente sobre una pantalla. Al hacerse visibles estos patrones de interferencia-difracción, se puede obtener información acerca de las características del objeto de estudio o de la misma naturaleza de la luz incidente. Ahora, si el campo electromagnético asociado al haz incidente posee un carácter aleatorio, dichos fenómenos de interferencia y difracción varían notablemente, observándose una disminución de la visibilidad de las franjas de interferencia o la pérdida de los patrones típicos de difracción generados por obstáculos con una forma geométrica bien definida.

La necesidad de poseer mayor disponibilidad de elementos de trabajo de bajo costo en el laboratorio para la realización de montajes interferométricos, nos llevo al estudio de fibras ópticas que permitan dejar de lado en algunos experimentos el uso de espejos de primera superficie que son de un alto costo. Debido a lo anterior, se optó por realizar un estudio con una fibra óptica comercial multimodo debido a su disponibilidad y bajo costo; usadas en sistemas de iluminación y en dispositivos electrónicos con puertos ópticos de audio y video. En algunas ocasiones los fabricantes de este tipo de fibras no ofrecen información específica acerca de las características de la fibra como lo son: los índices de refracción del núcleo y el revestimiento, perfil de la fibra y apertura numérica.

En este trabajo nos enfocamos en el estudio de los patrones de difracción generados por una doble abertura que ha sido iluminada por un campo emergente de una fibra óptica multimodo (marca MAXELL, diámetro del núcleo=1.0 mm). Los patrones de interferencia-difracción generados debido a la incidencia de un campo aleatorio (o de speckle) sobre un par de aberturas, no presentaban la proyección esperada en el campo cercano (es decir, cuando se realizó el experimento de Young con la fibra óptica

multimodo, se esperaba que el campo de speckle luego de ser difractado debido a las rendijas proyectara la imagen de las dos rendijas en el campo cercano, en lugar de esto, se obtuvo la proyección de una rendija con el speckle central de la imagen modulado en dirección paralela a las rendijas). Cabe aclarar, que el fabricante menciona que la fibra en cuestión es monomodo pero no se tiene información en que rango de longitud de onda. En el estudio realizado, la fibra óptica marca MAXELL se comportó como una fibra multimodo para una longitud de onda de 632.8 nm correspondientes al láser He-Ne. En la figura 1.1 se puede observar el patrón de interferencia-difracción generado por un par de rendijas (con un ancho y separación igual a 0.3 mm) al ser iluminadas con el campo aleatorio generado por la fibra (los registros se tomaron bajo los mismos parámetros, sin modificar las distancias involucradas en el sistema, la única variación fue el cambio del difusor por la fibra):

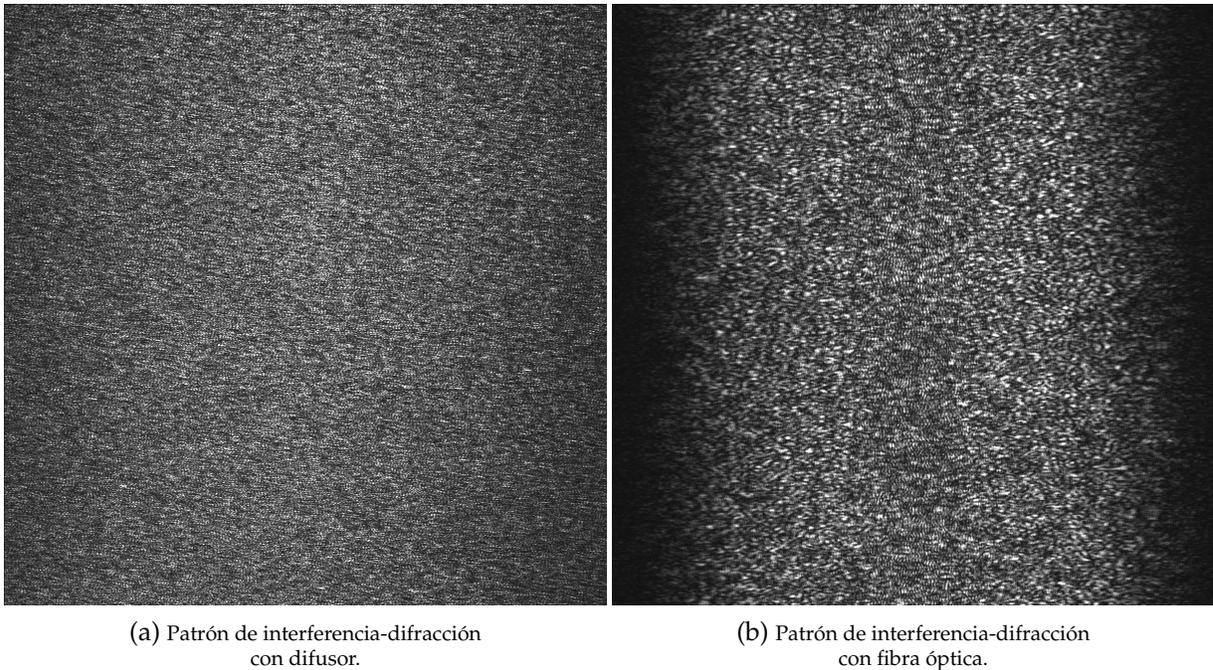


Figura 1.1: Patrón de interferencia-difracción por una par de rendijas con un ancho y una separación igual a 0.3 mm (este patrón se registró a 20.0 mm de las aberturas respecto a la cámara y la distancia entre la fuente de luz y el par de aberturas fue 1.0 mm).

El speckle o la distribución aleatoria del campo electromagnético se puede generar con una fuente altamente coherente que incida sobre vidrio esmerilado o sobre una fibra óptica multimodo, de esta forma en un plano imagen posterior al difusor o a la salida de la fibra, se podrá observar la aleatoriedad del campo o lo que llamamos moteado. Ahora, al hacer incidir el haz sobre un obstáculo, este campo electromagnético modificado espacialmente debido al uso de un vidrio despulido o una fibra óptica multimodo

(manteniendo los mismos parámetros geométricos del sistema) formará un patrón de interferencia-difracción donde el speckle se ve claramente diferente en ambos casos. Teniendo en cuenta las figuras anteriores, se puede observar que para el caso del difusor, el tamaño del speckle es pequeño comparado con el de la fibra. Para el caso de la fibra óptica multimodo, dicho patrón de interferencia-difracción varía respecto al anterior en la parte central del mismo, la modulación del speckle refleja un comportamiento vertical (donde se esperaba la proyección de la sombra de la doble rendija, se obtuvo un patrón de interferencia-difracción en el campo cercano el cual parece provenir de una sola rendija). Esto último nos lleva a preguntarnos, ¿Qué está pasando con el patrón de interferencia-difracción cuando la aleatoriedad del campo proviene de una mezcla de modos debido a una fibra óptica?

En la actualidad, no se tienen referencias acerca del estudio en el campo cercano de patrones de interferencia-difracción generados por el haz proveniente de una fibra óptica multimodo sobre un obstáculo. En la literatura se encontraron algunas referencias acerca del análisis de patrones de interferencia-difracción con campos electromagnéticos aleatorios debidos a un difusor pero no debidos al uso de una fibra [1–6].

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Principios de la Teoría de Difracción

Entendemos por difracción como el fenómeno que observamos cuando la luz al seguir una trayectoria rectilínea, sufre una desviación debido a obstáculos o bordes que la onda encuentra al propagarse en el espacio libre. Para observar claramente dicho fenómeno, las dimensiones de los obstáculos que atraviesa la luz deben ser comparables a su longitud de onda. Por consiguiente, se pueden registrar dos patrones de difracción diferentes para un mismo obstáculo tanto en el campo cercano (Fresnel) como en el campo lejano (Fraunhofer) [7,8].

#### 2.1.1. Principio de Huygens-Fresnel para coordenadas rectangulares

Para analizar el fenómeno de difracción, se tomará una abertura ubicada en el plano  $(\xi, \eta)$  sobre la cual incide una onda luminosa en dirección  $z$  positiva con longitud de onda  $\lambda$  (ver Figura 2.1):

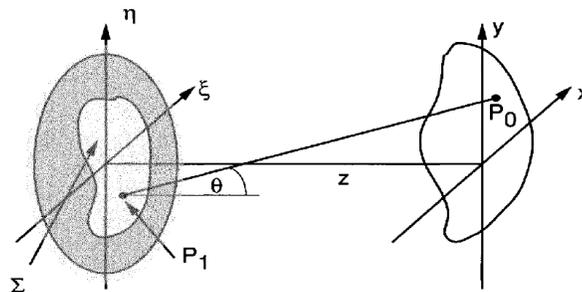


Figura 2.1: Plano de apertura y plano de observación separados una distancia  $z$ . Tomado de la referencia [7].

Ahora se procede a calcular el campo difractado en el plano  $(x,y)$  de la figura 2.1. El plano de la abertura  $(\xi,\eta)$  se considera paralelo al plano de observación  $(x,y)$  y estará ubicado a una distancia de separación  $z$ . El principio de Huygens-Fresnel se puede expresar de la siguiente forma:

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \int \int_{\Sigma} U(P_1) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\theta) ds \quad (2.1)$$

donde  $U(P_0)$ : es el campo difractado por la abertura en el punto  $P_0$  en el plano de observación.  $\Sigma$ : área de la abertura.  $U(P_1)$ : campo incidente evaluado en el punto  $P_1$  del plano  $(\xi,\eta)$ .  $\theta$ : ángulo entre la normal  $\hat{n}$  al plano de la abertura y el vector  $r_{01}$ . Por último  $r_{01}$  es la magnitud del vector  $r_{01}$  que va del punto  $P_1$  al punto  $P_0$ . De la figura 2.1 se puede calcular  $\cos(\theta)$  teniendo en cuenta que  $z$  es la distancia entre los planos  $(\xi,\eta)$  y  $(x,y)$ :

$$\cos(\theta) = \frac{z}{r_{01}}, \quad ds = d\xi d\eta \quad (2.2)$$

En adelante  $(\xi,\eta)$  será el plano de incidencia o plano de la estructura difractiva y  $(x,y)$  el plano de observación. Reemplazando el valor de  $\cos(\theta)$  en la ecuación 2.1, se obtiene que el campo difractado es:

$$U(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \int \int_{\Sigma} U(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr_{01})}{(r_{01})^2} d\xi d\eta \quad (2.3)$$

en la ecuación anterior la distancia  $r_{01}$  toma el valor de  $\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}$

La ecuación 2.3 da cuenta del valor del campo difractado en el punto  $(x, y)$  bajo dos suposiciones, la primera es una aproximación inherente a la Teoría Escalar donde se hace una simplificación que no tiene en cuenta el carácter vectorial de los campos electromagnéticos; y la segunda que  $\lambda \ll r_{01}$ .

En general la Teoría de difracción presenta dos aproximaciones: La aproximación de Fresnel y la aproximación de Fraunhofer.

### 2.1.2. Aproximación de Fresnel

La finalidad del presente estudio es llegar a una expresión simple del campo cercano en un punto determinando del plano de observación. Por lo anterior, se realizarán dos aproximaciones mas al principio de Huygens-Fresnel que se ve reflejado en la ecuación 2.1. Las aproximaciones a realizar sobre dicho principio se harán sobre  $r_{01}$ . A continuación se tendrá en cuenta una expansión binomial de la raíz cuadrada de  $r_{01}$ :

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots \quad \text{con} \quad b \ll 1 \quad (2.4)$$

Antes de aplicar la aproximación anterior, se factoriza la variable  $z$  en  $r_{01}$  obteniendo:

$$r_{01} = z \sqrt{1 + \left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 + \left(\frac{y-\eta}{z}\right)^2} \quad \text{donde} \quad b = \left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 + \left(\frac{y-\eta}{z}\right)^2 \quad (2.5)$$

Tomando los dos primeros términos de la expansión binomial se tendría que la raíz cuadrada de  $r_{01}$  se puede escribir aproximadamente como:

$$r_{01} \approx z \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y-\eta}{z}\right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Con las aproximaciones anteriores, la expresión resultante para el campo en el punto  $(x,y)$  vendrá a ser:

$$U(x,y) = \frac{\exp(jkz)}{jz\lambda} \int \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \exp \left\{ \frac{jk}{2z} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2] \right\} d\xi d\eta \quad (2.7)$$

En la expresión anterior se hizo una aproximación en el denominador para  $r_{01}^2$ , solo basta considerar el primer término ya que el error por no tener en cuenta los demás términos es muy pequeño. El campo descrito en la ecuación 2.7 se conoce como la integral de difracción de Fresnel. Cuando se trabaja con la aproximación anterior, se dice que el plano de observación se encuentra en el Campo Cercano de la abertura o que el campo observado está en la región de Difracción de Fresnel.

### Difracción de Fresnel por una abertura cuadrada

Para realizar el análisis de la difracción de Fresnel por una abertura cuadrada, se estudiará el caso simple de una abertura de ancho  $2w$  sobre la cual se hará incidir una onda plana monocromática de amplitud unitaria de manera perpendicular al plano de la abertura. La distribución del campo inmediatamente después de la abertura es [9]:

$$U(\xi, \eta) = \text{rect}\left(\frac{\xi}{2w}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{2w}\right) \quad (2.8)$$

Por lo tanto, el campo evaluado en el punto  $(x,y)$  tomará la siguiente forma:

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{jz\lambda} \int \int_{-w}^w \exp\left\{\frac{j\pi}{z\lambda} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\xi d\eta \quad (2.9)$$

La solución a la ecuación 2.9 (realizando un cambio de variable para el argumento de la exponencial) estará dada por las integrales de Fresnel debido a que no es posible obtener una solución analítica para dicha integral.

### 2.1.3. Número de zonas de Fresnel

Previamente se han establecido criterios de difracción de Fresnel y difracción de Fraunhofer debido a la iluminación de una abertura con una onda plana monocromática. El número de zonas de Fresnel,  $N$ , nos permite conocer la región en la cual se está proyectando el patrón de difracción generado por una única abertura o una estructura compleja. La expresión para  $N$  se puede observar en la siguiente ecuación [9]:

$$N = \frac{R^2}{\lambda} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (2.10)$$

donde  $R$  es el radio de la abertura o del círculo que circunscribe la estructura compleja,  $a$  es la distancia de la fuente a la abertura,  $b$  es la distancia de la abertura al punto central en el plano de observación;  $a$  y  $b$  son segmentos que están sobre un mismo eje que es normal tanto al plano de la abertura como al plano de observación. Dicha expresión sólo es válida para  $R \ll a$  y  $R \ll b$ .

Las condiciones establecidas a partir de dicho parámetro son [10]:

- $N \leq 1$  Condición de difracción de Fraunhofer
- $N > 1$  Condición de difracción de Fresnel

De acuerdo con el trabajo “*Criterios en difracción e interferencia para múltiples aberturas*”, para una misma máscara se pueden definir dos parámetros: un primer parámetro se definirá como  $N_i$ , que será el número de zonas de Fresnel subtendidas por una abertura individual que se encuentra a su vez dentro de una estructura compleja (donde  $R$

en este caso será el radio del círculo que circunscribe la estructura compleja). El segundo parámetro será  $N_e$ , que corresponderá al número de zonas de Fresnel subtendidas por la estructura general. Una estructura dentro de una máscara se puede entender como dos o más aberturas de forma regular o irregular distribuidas de manera ordenada o al azar sobre la máscara (ver figura 2.2):

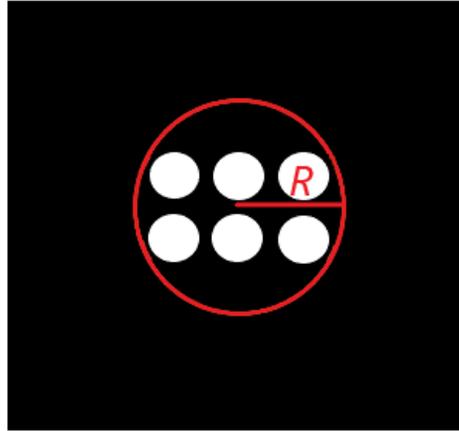


Figura 2.2: La estructura total es reemplazada por una abertura equivalente de radio  $R$ , que corresponde al círculo que circunscribe la estructura compleja. Cada abertura individual tiene radio  $r$ .

Para  $N_i$  y  $N_e$  se tienen las siguientes condiciones:

- Cuando  $N_i \leq 1$  y  $N_e > 1$  se tendrá difracción de Fraunhofer individual (zona de transición).
- Cuando  $N_i > 1$  y  $N_e > 1$  se tiene difracción de Fresnel por la estructura total (zona de Fresnel).
- Cuando  $N_e \leq 1$  y  $N_i < 1$  se tiene difracción de Fraunhofer por la estructura total (zona de Fraunhofer).

### Predominio Interferencia-Difracción

- Si  $N_e > 1$  el efecto de interferencia es tenue, y éste sería una función del número de elementos y la separación entre ellos. Además, el efecto de difracción se describe mediante la Transformada de Fresnel.

- Si  $N_e < 1$ , los efectos de interferencia son predominantes frente a los de difracción y pasan a ser independientes del número de elementos y su separación. Además, el efecto de difracción se describe mediante la Transformada de Fourier, por tanto se tendría difracción de Fraunhofer.

Para reconocer la forma de la estructura de una abertura individual se debe tener en cuenta el valor de  $N_e$  :

- Si  $N_e \leq 1/3$ , observando el patrón de difracción es imposible deducir la forma del elemento individual.
- Si  $N_e > 1/3$ , es posible a partir del patrón de difracción reconocer la forma del elemento individual.

Según lo anterior, obteniendo el parámetro  $N_e$  se puede determinar el tipo de difracción generado por la estructura compleja y se puede establecer un criterio de reconocimiento de la forma del elemento individual a partir del patrón de difracción que ésta produce [9–11].

#### 2.1.4. Aproximación de Fraunhofer

Para estudiar la aproximación de Fraunhofer se partirá de la ecuación 2.3 que hace referencia al valor del campo en el punto(x,y) en el plano de observación. Es posible hacer una aproximación más para la variable  $z$ :

$$z \gg \frac{k(\xi^2 + \eta^2)_{max}}{2} \quad (2.11)$$

Por tanto, teniendo en cuenta la aproximación anterior en el factor de fase cuadrática dentro de la integral 2.3, se obtiene que este valor de fase toma el valor de la unidad, lo cual nos lleva a obtener que el campo  $U$  se puede encontrar realizando una transformada de Fourier sobre la distribución de la abertura. Para un  $z$  muy grande comparado con las dimensiones de la abertura, se tendrá el patrón de difracción en la región de Fraunhofer o comúnmente llamado Campo lejano. El campo toma la siguiente forma:

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz) \exp\left(\frac{jk(x^2+y^2)}{2z}\right)}{jz\lambda} \int \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \exp\left[\frac{-j2\pi}{z\lambda}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta \quad (2.12)$$

No se debe olvidar que la Difracción de Fraunhofer es un caso especial de la Difracción de Fresnel.

### Difracción de Fraunhofer por una abertura cuadrada

Consideremos una abertura rectangular iluminada de manera perpendicular por una onda plana monocromática de amplitud unitaria [12]:

$$t_a(\xi, \eta) = \text{rect}\left(\frac{\xi}{2w_x}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{2w_y}\right) \quad (2.13)$$

donde  $w_x$  y  $w_y$  son los anchos medios de la abertura en los ejes  $\xi$  y  $\eta$  respectivamente. Partiendo de la ecuación 2.12 se puede llegar a que el campo evaluado en los puntos  $x$  y  $y$  toma la siguiente forma:

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz) \exp\left(\frac{jk(x^2+y^2)}{2z}\right)}{jz\lambda} A \text{sinc}\left(\frac{2xw_x}{z\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{2yw_y}{z\lambda}\right) \quad (2.14)$$

donde  $A = 4w_x w_y$  es el área de la abertura.

## 2.2. Fenómeno de Speckle

Cuando una superficie difusora se ilumina con un haz coherente, se observa del otro lado del difusor un patrón de puntos brillantes y oscuros llamado speckle (ver figura 2.3). Este conjunto de puntos que también llamaremos moteado, se entiende como la interferencia aleatoria de las ondas dispersadas por cada rugosidad. Este fenómeno se analizó cada vez más, ya que este tiene diversas aplicaciones metrológicas como lo son la medición de desplazamientos, deformaciones, fracturas, en particular aquellas empleadas en ensayos no destructivos.

La luz con coherencia espacial que se dispersa debido a la incidencia sobre una superficie difusa, llena la región circundante con una distribución de intensidad aleatoria. En cualquier posición en el espacio, el campo resultante es la superposición de muchos frentes de onda, donde si se tienen franjas de interferencia éstas estarán determinadas por el grado de coherencia del campo [13].

Cuando dos o más ondas electromagnéticas desfasadas pero coherentes, se propagan a través de un medio, se puede generar un patrón de forma granular. Por lo tanto el patrón de speckle tendrá una gran cantidad de puntos brillantes donde los haces interfieren constructivamente, y un gran número de puntos oscuros donde decimos que la interferencia de los haces es destructiva, ver figura 2.3.

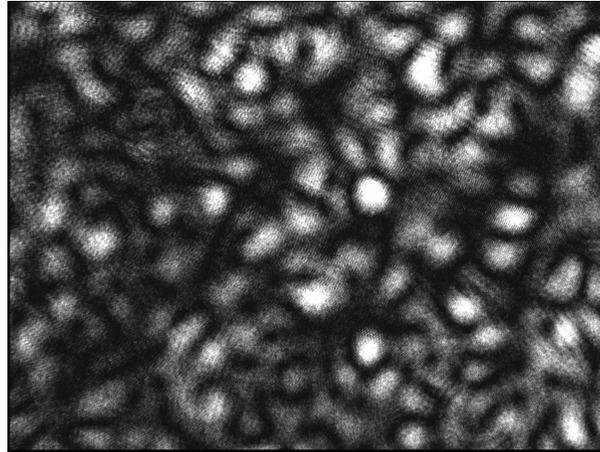


Figura 2.3: Patrón de Speckle generado por un difusor.

El patrón de speckle no se encuentra localizado, llena todo el espacio entre la superficie dispersora y el plano de observación, siendo una interferencia en 3D, donde a cada gránulo se le hace un corte transversal al proyectarlo sobre una pantalla. Al ser el patrón de speckle un fenómeno aleatorio, solo puede ser descrito estadísticamente; esta estadística se ha estudiado tanto teórica como experimentalmente, donde se ha concluido que dicha propiedad esta ligada a la estadística del cuerpo difusor y al grado de coherencia de luz.

Estos granos creados por interferencia aleatoria pueden tener una modulación interna y externa debido a la presencia de una doble abertura. La modulación interna es debida a la interferencia de las dos ondas con carácter aleatorias provenientes de las dos aberturas, y la modulación externa, se debe al efecto de una sola abertura sobre el campo; el efecto es más visible cuando las aberturas iluminadas son rendijas, ya que el grano se ve modulado en dirección perpendicular a la dirección de las mismas.

En la formación del patrón de speckle se destacan dos casos:

- Speckle objetivo: Patrón observado en una pantalla o detector paralelo a la superficie rugosa, sin la intervención de un sistema óptico en el camino de la onda entre el difusor y el detector. Ver figura 2.4
- Speckle subjetivo: Patrón enfocado en un punto del espacio por un sistema formador de imagen. En este caso existe un sistema óptico entre el difusor y el punto de observación. Ver figura 2.5

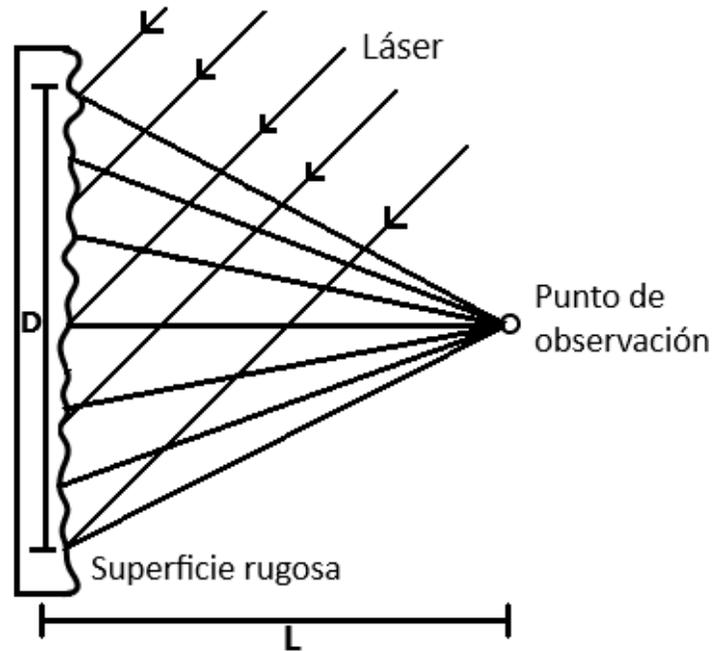


Figura 2.4: Sistema de formación del speckle objetivo.

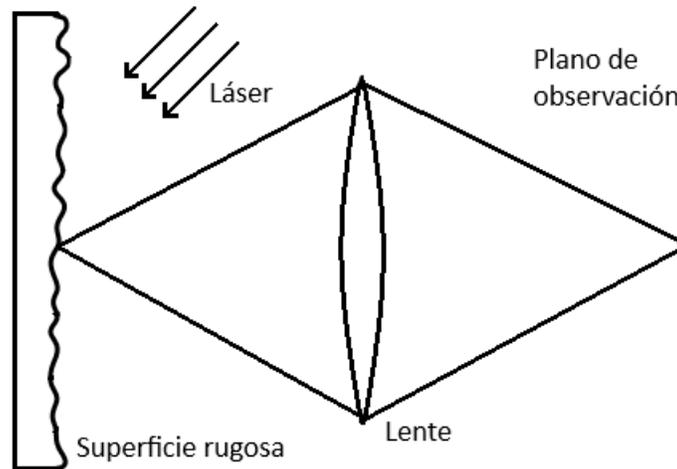


Figura 2.5: Sistema de formación del speckle subjetivo.

Como se mencionó anteriormente, al tratarse el speckle de un fenómeno aleatorio, se necesita un tratamiento estadístico para describirlo. En general, las propiedades estadísticas que describen tanto al speckle objetivo como al speckle subjetivo son las

mismas.

Las propiedades de cada punto del patrón de speckle pueden ser descritas a través de la estadística de primer orden, sin tener en cuenta la relación existente entre cada punto. La estadística de segundo orden da información acerca de cuán rápido varía la intensidad entre dos puntos del patrón, por lo cual, permite estimar el tamaño del grano y su distribución. Para el estudio de la estadística se tiene en cuenta que la fuente de luz es coherente y el campo de naturaleza aleatoria tiene la siguiente forma:

$$U = A \exp(j2\pi\nu t) \quad \text{donde} \quad A = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \exp(j\phi_k) \quad (2.15)$$

Para los dispersores elementales se asumen dos condiciones:

- La amplitud  $a_k$  y la fase  $\phi_k$  son estadísticamente independientes, y a su vez son estadísticamente independientes de la amplitud y la fase de los demás fasores.
- Las fases están uniformemente distribuidas entre  $-\pi$  y  $+\pi$  y la amplitud compleja se puede describir a través de una estadística Gaussiana.

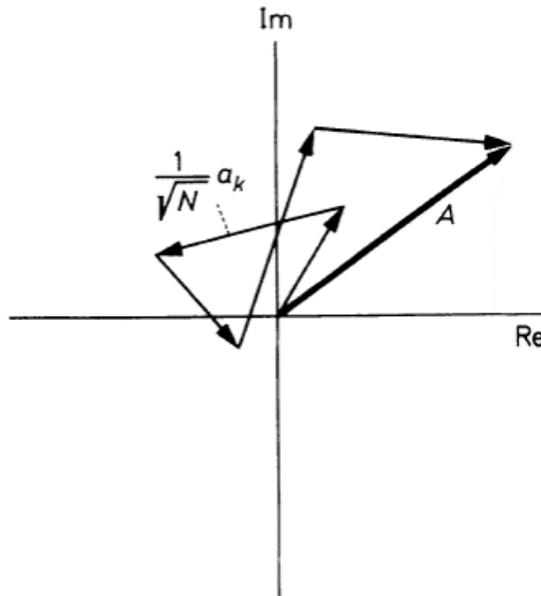


Figura 2.6: Suma de fasores [14].

Donde  $A$  es la amplitud del fasor que se puede ver como una sumatoria de los  $N$  fasores elementales,  $a_k$  y  $\phi_k$  es la amplitud y la fase del  $k$ -ésimo fasor respectivamente. Ver figura 2.6. Por tanto, el campo  $U$  aleatorio en el plano  $(\xi, \eta)$  tiene la siguiente forma:

$$U_{speckle} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \exp [j(\phi_k + 2\pi\nu t)] \quad (2.16)$$

Este campo aleatorio representa por ejemplo, al campo generado por un haz de luz coherente luego de incidir sobre un difusor o vidrio esmerilado. Como se explicó anteriormente, este nuevo campo es el resultado de la interferencia tridimensional de las ondas que son dispersadas debido a la rugosidad del difusor. Para la mayoría de los fines, sólo nos interesa el tamaño y la distribución del brillo del patrón sobre un plano paralelo al difusor [14].

### 2.2.1. Tamaño del speckle

La estadística de segundo orden nos brinda un estimado del tamaño del speckle. Éste se estima considerando la media estadística de la distancia entre regiones adyacentes de brillo máximo y mínimo, y siempre está relacionado con el ángulo de apertura que subtiende la radiación incidente sobre el plano que define el campo de speckle.

- El tamaño del Speckle objetivo,  $\sigma'$ , formado en un plano de observación que se encuentra ubicado a una distancia  $L$ , medida desde el punto de propagación del campo aleatorio es aproximadamente:

$$\sigma' \approx \frac{1.2\lambda L}{D} \quad (2.17)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del láser y  $D$  es el diámetro de la región circular que es iluminada sobre el difusor.

- Ahora, si se trata de encontrar el tamaño aproximado del speckle subjetivo,  $\sigma$ , este estará relacionado con la apertura numérica de la lente (N.A.):

$$\sigma \approx \frac{0.6\lambda}{N.A.} \quad (2.18)$$

### 2.2.2. Distribución del brillo

La distribución del brillo de un patrón de speckle completamente desarrollado está determinado por una función exponencial negativa:

$$p(I) = (1/I_0) \exp(-I/I_0) \quad (2.19)$$

donde  $p(I)$  es la función densidad de probabilidad de la intensidad, y da información sobre la probabilidad de que un speckle o mota tenga un brillo entre los valores  $I$  e  $(I+dI)$ ,  $I_0$  es la intensidad promedio. En la figura 2.7 se puede visualizar la relación anterior, donde se observa que es más probable obtener en un campo aleatorio, speckles oscuros que speckles con algún grado de intensidad. Esta es la propiedad que permite distinguir un patrón de speckle completamente desarrollado de un patrón de speckle parcialmente desarrollado o menos desarrollado.

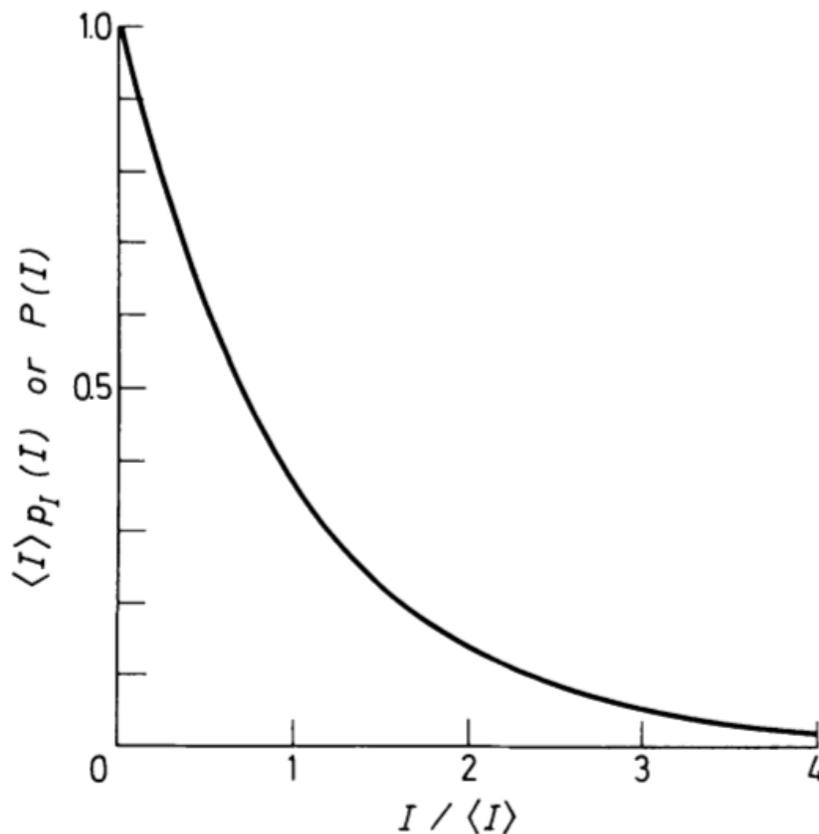


Figura 2.7: Función densidad de probabilidad de la intensidad para un campo aleatorio [14].

Cuando se tienen dos campos de speckles que interfieren, el tamaño del speckle no se ve alterado pero sí su distribución de la intensidad. Si los dos campos aleatorios iniciales se superponen coherentemente, el resultado será un tercer patrón de speckle cuyo tamaño y distribución estadística de brillo seguirá siendo la misma.

### 2.3. Almacenamiento de datos con la orientación del speckle

Si necesitamos almacenar datos, es muy común recurrir al speckle orientado o a una técnica de exposición múltiple. En la figura 2.8 se muestra un patrón de speckle modulado por una abertura, donde A es una transparencia, H es el plano de observación, G es el vidrio esmerilado el cual es iluminado por una fuente láser, y T es la abertura que en este caso es una rendija:

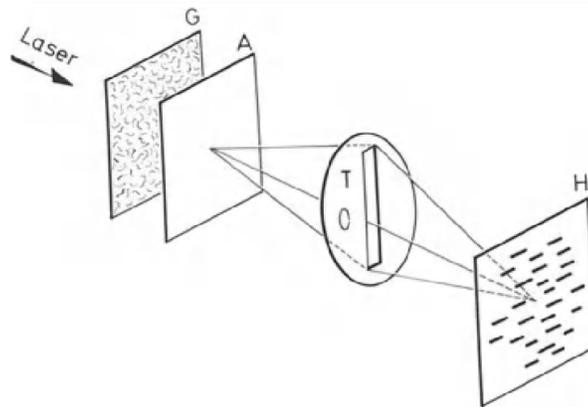


Figura 2.8: Speckle orientado debido a una rendija [14].

En la figura anterior podemos observar que el speckle está orientado en una dirección perpendicular al lado más ancho de la rendija. Además, la luz se difracta más en la dirección perpendicular a la orientación del speckle que en la dirección de su eje longitudinal. Lo anterior permite registrar patrones de difracción con una rendija en diferentes posiciones azimutales y luego separarlas con un filtro espacial.

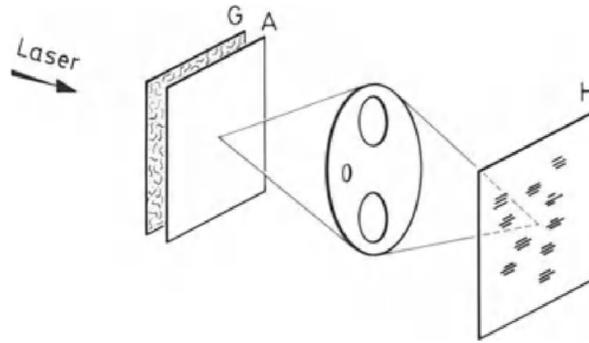


Figura 2.9: Speckle orientado debido a una doble abertura circular [14].

El esquema de la figura 2.8 se puede variar usando un arreglo de aberturas. En el caso más simple se pueden usar dos aberturas circulares, como se muestra en la figura 2.9, en este caso el patrón de speckle se ve modulado por las franjas de Young y la distancia entre franjas adyacentes será  $\lambda L/D$ , donde  $L$  es la distancia entre las aberturas y el plano de observación, y  $D$  es la separación entre las aberturas.

## 2.4. Speckle generado por una fibra óptica multimodo

Cuando se tiene un haz de luz coherente que se propaga a través de una fibra óptica multimodo, se observa que tanto en el campo lejano como en el campo cercano, se presenta una interferencia aleatoria o cierta distribución de intensidad de forma granular. Esta intensidad granular es lo que conocemos como patrón de Speckle, algo ya visto en la sección anterior. Esta distribución de intensidad aleatoria se produce por la interferencia de los  $N$  modos de propagación que viajan a través del núcleo de la fibra a diferentes velocidades de fase. El número de fasores debido al vidrio despulido es mucho más grande que el número de modos de la luz que se propagan en el interior de la fibra, es por esto que decimos que el grado de aleatoriedad del vidrio es mayor que el de la fibra óptica, por tanto, la interferencia aleatoria a la salida de la fibra dependerá del número de modos que viajen a través de la misma.

En la figura 2.10 se muestra el haz que emerge de una fibra óptica multimodo, luego de que es iluminada en el extremo opuesto con un haz coherente proveniente de un láser. Se puede apreciar que la distribución de intensidad o el patrón de speckle generado por la fibra óptica multimodo es muy parecido al speckle generado por un difusor.

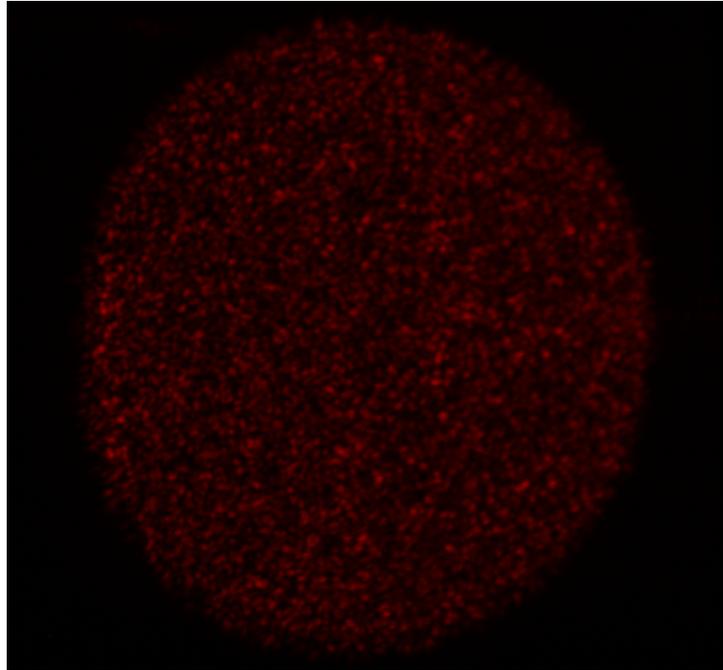


Figura 2.10: Speckle generado por una fibra óptica multimodo.

En general, veremos que la cantidad de speckles o el número de speckles es proporcional al número de modos que se propagan a través de la fibra óptica. Para tener una idea mas clara, se considera una fibra óptica con dos modos de propagación (ver figura 2.11) [15].

En la figura 2.11 se pueden observar dos modos propagándose en el interior del núcleo de la fibra óptica que al emerger de ésta, forman un patrón de franjas debido a la interferencia entre dos frentes de onda. Para este caso simple, de sólo dos frentes de onda se tienen franjas, donde cada franja corresponde a un speckle. Se debe tener en cuenta que el número de modos que existe dentro del núcleo de una fibra depende de la apertura numérica que es una característica de cada fibra. Por tanto, si la fibra posee una apertura numérica muy grande, el número de speckles será muy grande ya que existirían muchos caminos posibles dentro de la fibra para que la luz se propague. El campo emergente de la fibra tendrá la misma forma del campo generado por el vidrio despulido (Figura 2.3), sólo que el número de modos  $N$  de propagación es diferente para cada caso.

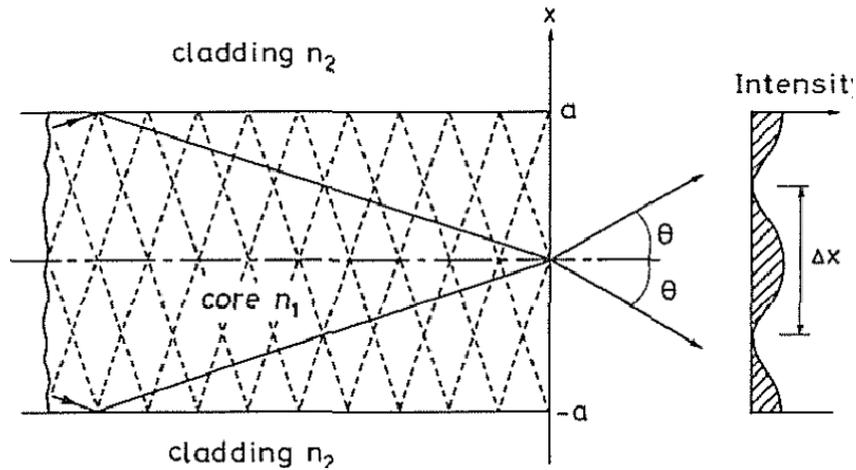


Figura 2.11: Interferencia de modos que se propagan en el interior de una fibra óptica.  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo de la fibra y de su recubrimiento respectivamente. Además,  $\Delta x$  es el tamaño del speckle [15].

El tamaño más pequeño del speckle,  $\Delta x$ , generado por una fibra óptica multimodo es aproximadamente:

$$\Delta x \approx \lambda/2(N.A.) \tag{2.20}$$

donde N.A. dependerá de los índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra. Cuando se tiene un patrón de interferencia, la estructura del patrón de franjas está determinado por el tamaño del speckle, ya que  $\Delta x$ , es aproximadamente la mitad del espacio entre las franjas de interferencia. El tamaño del speckle también determina el número total,  $N$ , de speckles sobre un plano:

$$N = \pi(a/\Delta x)^2 = \pi(2a(N.A.)/\lambda)^2 \tag{2.21}$$

donde  $a$  es el radio del núcleo de la fibra. Este número de speckles es muy parecido al número de modos que soporta una fibra de índice escalonado, el cual es:

$$N' = 2(\pi a(N.A.)/\lambda)^2 \tag{2.22}$$

La similitud entre el número de speckles  $N$ , y el número de modos  $N'$  es muy notable

(ecuaciones 2.21 y 2.22). El número de modos aumenta, si a su vez aumenta la apertura numérica, o si aumenta la razón entre el radio del núcleo de la fibra y la longitud de onda de la luz. Por lo tanto, una fibra con un diámetro (del núcleo) muy grande y una alta apertura numérica, mostrará a la salida un gran número de speckles. También es de notar, que un aumento en la longitud de onda de la luz, disminuye el número de speckles.

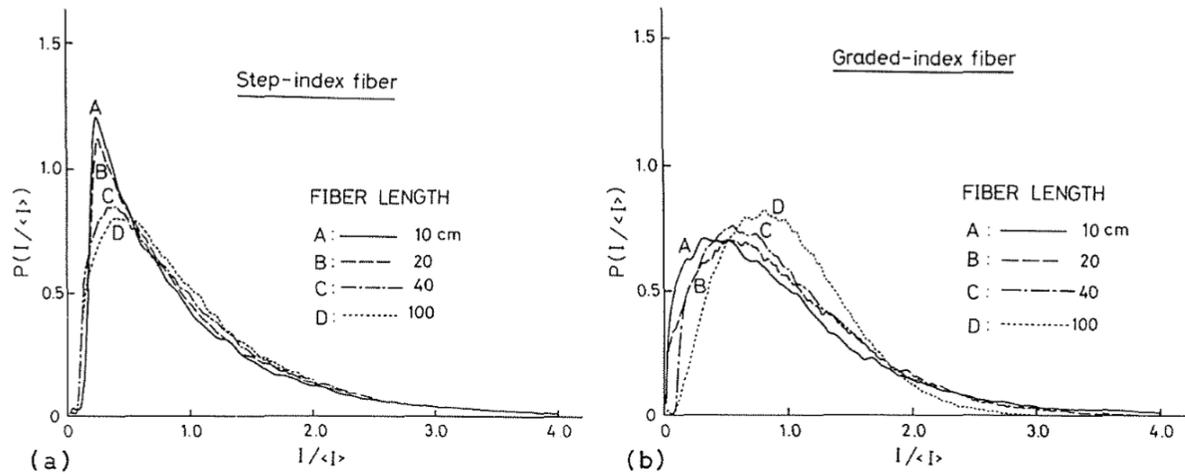


Figura 2.12: Función densidad de probabilidad del speckle generado por (a) una fibra de índice escalonado y (b) una fibra de índice gradual. Se tuvieron en cuenta 4 fibras con diferentes longitudes [15].

En la figura 2.12 (a) y (b) se grafica la función densidad de probabilidad de la intensidad del speckle, como una función de la longitud de la fibra óptica, tanto para una fibra de índice gradual como para una fibra de índice escalonado. La figura 2.12 (a) muestra que la función densidad de probabilidad cambia su forma exponencial decreciente. Si la longitud de la fibra de índice escalonado aumenta, el punto más alto de la curva disminuye. Por otro lado, para la fibra de índice gradual figura 2.12 (b) se tiene una distribución parecida a una distribución Gaussiana. Se considera que este tipo de distribución Gaussiana corresponde a un patrón de speckle con un contraste bajo; en este caso, a medida que aumenta la longitud de la fibra óptica de índice gradual, el punto más alto de la curva aumenta.

Se han realizado estudios con fibras ópticas multimodo de plástico, conocidas como fibras ópticas plásticas (POF). Para este tipo de fibras multimodo con diámetro igual a 1.0 mm, se ha encontrado que a través de este tipo de fibras se propagan un elevado número de modos, lo cual hace que la fibra sea muy sensible a efectos externos como vibraciones o aspectos ambientales.

# Capítulo 3

## Montaje experimental

La motivación de este proceso experimental es el análisis de patrones de interferencia-difracción generados por un campo de speckle emergente de una fibra óptica multimodo, y que incide sobre una máscara con un par de aberturas.

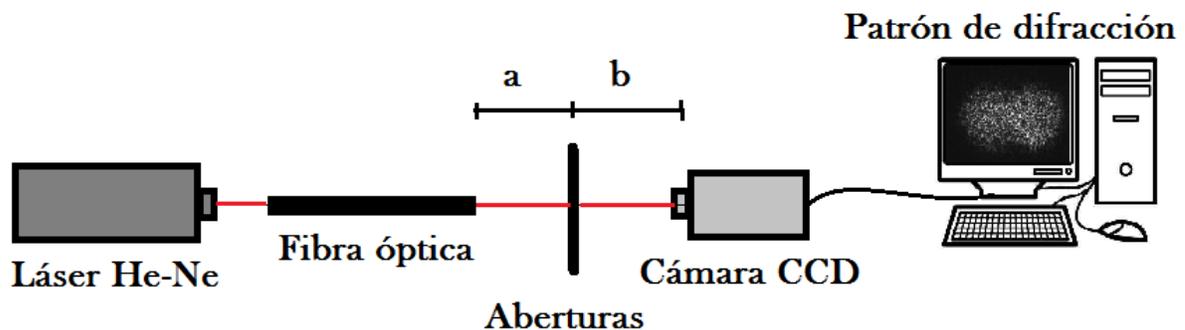


Figura 3.1: Montaje experimental donde se utiliza la fibra óptica multimodo como generadora del frente de onda incidente sobre las aberturas.

En la figura 3.1 se muestra el montaje experimental realizado con la fibra óptica donde el haz emergente de esta incide sobre un par de aberturas idénticas,  $a$  es la distancia de la fuente a la máscara y  $b$  es la distancia de la máscara al plano de observación. En adelante, se hablará de máscara, abertura o estructura difractiva de manera indiferente. El patrón de interferencia-difracción generado por la estructura difractiva se registra con una cámara CCD a una distancia  $b$  del plano de la máscara. A continuación se detallan los elementos que hacen parte del montaje experimental:

- Para la iluminación se usó un láser He-Ne de  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .

- Se usaron estructuras difractivas de diferentes formas geométricas (circulares, cuadradas y rendijas) para verificar si la modulación del speckle se daba también para cualquier otro tipo de abertura. Las estructuras se pueden visualizar en la figura 3.2.
- Como sistemas generadores de speckle se hizo uso de un vidrio esmerilado y una fibra óptica multimodo con un diámetro igual a 1.0 mm. Al tomar las imágenes con el vidrio esmerilado, solo se reemplazó en la figura 3.1 la fibra óptica por el vidrio sin alterar los parámetros geométricos del montaje.
- El registro del patrón de interferencia-difracción se realizó a través de una cámara CCD conectada a un monitor. La cámara usada es marca SONY modelo No SSC-M370 CCD black and White video camera, con un tamaño de píxel de  $9 \mu\text{m}$ .

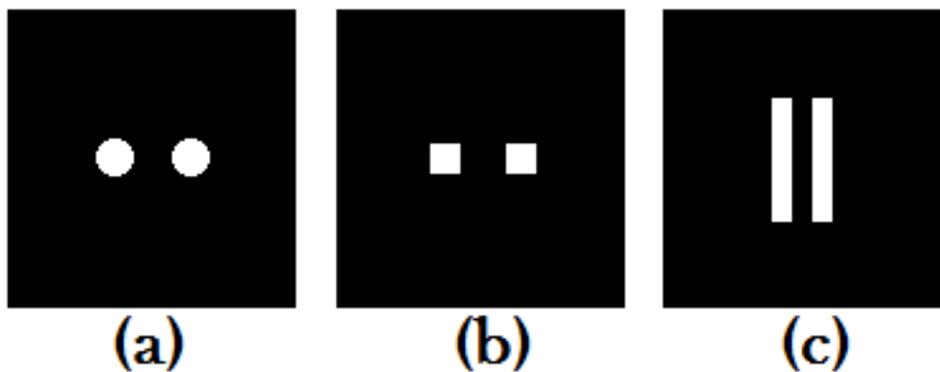


Figura 3.2: Máscaras usadas en el montaje experimental: (a) Máscara con aberturas circulares de igual radio, (b) Máscara con aberturas cuadradas de igual ancho y (c) Máscara con doble rendija de igual ancho.

Para cada máscara usada se realizó una variación de los radios, anchos y separación entre aberturas. El único parámetro que se mantuvo fijo fue la distancia entre la fuente utilizada y el plano de la máscara, ésta sería la distancia  $a$  de acuerdo a la figura 3.1.

El procedimiento experimental se hizo de la siguiente manera:

1. Partiendo de la figura 3.1, luego de la posición del láser se ubicó un sistema de colimación para convertir el haz del láser en un frente de onda plano el cual incidía sobre las distintas estructuras difractivas. Luego en dos posiciones distintas (a 20 y 40 mm del plano de las aberturas) se ubicaba la cámara CCD respecto a la máscara para realizar el respectivo registro del patrón interferencia-difracción. Por tanto, para cada máscara se tiene una par de imágenes donde se varía el parámetro  $b$ .

2. El paso siguiente consistió en variar el frente de onda, aquí se prescindió del sistema de colimación y se dirigió el haz del láser directamente sobre un objetivo (esto con el fin de aumentar el tamaño del haz). Con el nuevo frente de onda esférico se incidió sobre un vidrio esmerilado, del que se obtenía un campo lo suficientemente aleatorio para generar un patrón de speckle. Con el campo formado por el vidrio o difusor, se incidió sobre las estructuras difractivas, obteniendo nuevamente dos imágenes a distintas distancias  $b$  ya mencionadas anteriormente.
3. Como paso siguiente, se cambió el vidrio por una fibra óptica multimodo marca MAXELL (diámetro de la fibra = 1.0 mm) ubicada tal como aparece en la figura 3.1. Recordemos que aunque en el interior de la fibra óptica multimodo se produce una mezcla de  $N$  modos (y dicha mezcla depende del diámetro del núcleo de la fibra y  $\lambda$ ), esta mezcla no es comparable con la mezcla de modos que se produce al incidir un haz de luz sobre una superficie despulida como lo es el vidrio esmerilado. De tal forma que se obtuvo una nueva distribución de intensidad con un nuevo grado de aleatoriedad. Con esta nueva estructura de iluminación se incidió sobre las máscaras y en el plano de observación se obtuvieron las imágenes registradas por la CCD.
4. Para finalizar, se realizó una simulación en Python manteniendo los mismos parámetros del montaje de la figura 3.1. Con la simulación se busca hacer un contraste con los resultados experimentales del vidrio, para tener una mejor comprensión de dichos patrones.

```

N = 2048 #tamaño matriz
dx = 5.0e-6 #muestreo
radiog=int(0.6e-3/dx) #radio que controla el tamaño del speckle, se dejó fijo
radio = int(0.1e-3/dx) #radio de la abertura en metros
W0 = 1e-3 #cintura haz gaussiano en metros
A0 = 1. #amplitud haz gaussiano
wl = 633.e-9 #Longitud de onda en metros
z = 0. #posición en la que se observa el gaussiano en metros
dist1 = 10.0e-3 #distancia de propagación a la máscara en metros
dist2 = 20.0e-3 #distancia de propagación primer plano de observación en metros
dist3 = 2*dist2 #distancia de propagación segundo plano de observación en metros
a = int(0.1e-3/dx) #tamaño rendija en metros
b = int(0.15e-3/dx) #separación doble rendija en metros

pupil = Fun.cmask(int(N/2),int(N/2),radiog,N) #pupila
gauss = Fun.Gbeam(N,dx,W0,A0,wl,z,0) #haz gaussiano
fase = np.exp(1j*np.random.rand(N,N)*2*np.pi) #fase aleatoria

beam = pupil*gauss*fase #haz plano de entrada
#beam = pupil*gauss #haz plano de entrada sin fase aleatoria

```

Figura 3.3: Parámetros de la simulación. Los parámetros radio,  $a$  y  $b$  se modificaban al cambiar de abertura, haciendo coincidir estos valores con los valores geométricos reales.

Inicialmente se generó un haz gaussiano y una fase aleatoria, luego el haz de entrada se construyó con la multiplicación de ambos por una máscara con una abertura circular de radio fijo (esta máscara ayuda a delimitar el área iluminada en el plano de entrada, lo cual busca emular tanto la salida del campo en la fibra óptica como la salida del campo en el vidrio). Ahora, con el propagador Función de transferencia de Fresnel (TF) se propagó el campo aleatorio hasta la estructura difractiva una distancia fija  $a$ . Finalmente, se obtuvieron las imágenes de los patrones de interferencia-difracción, propagando el nuevo campo difractado por el par de aberturas una distancia  $z=b=2a$  y  $z=b=4a$  (en la figura 3.3 se muestran algunos de los parámetros usados en la simulación).

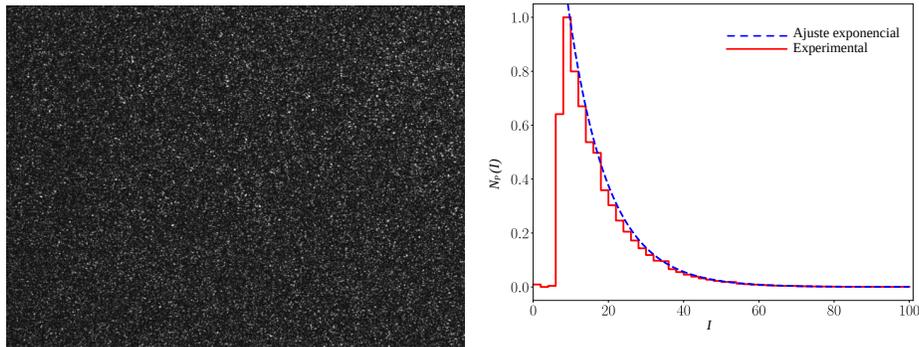


Figura 3.4: La imagen de la izquierda corresponde al patrón de speckle generado por un vidrio despulido, y la imagen de la derecha es la gráfica normalizada del número de píxeles ( $N_P$ ) Vs Intensidad ( $I:0 \rightarrow 100$ , donde 0 representa el color negro y 100 el color blanco) de la imagen de la izquierda.

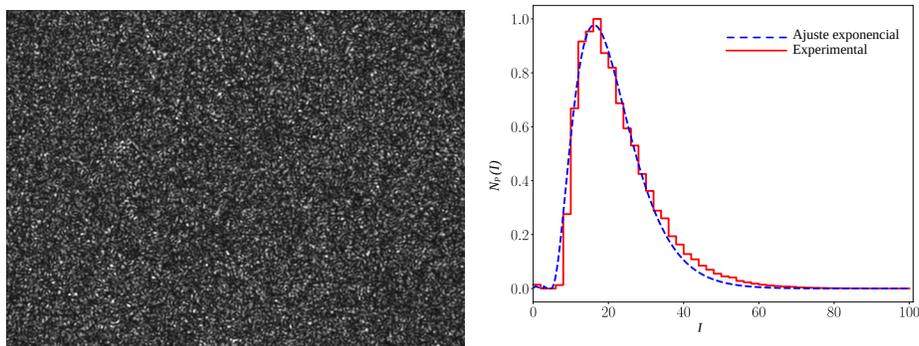


Figura 3.5: La imagen de la izquierda corresponde al patrón de speckle generado por la fibra óptica multimodo marca MAXELL, y la imagen de la derecha es la gráfica normalizada del número de píxeles ( $N_P$ ) Vs Intensidad ( $I:0 \rightarrow 100$ , donde 0 representa el color negro y 100 el color blanco) de la imagen de la izquierda.

En las imágenes 3.4 y 3.5 se puede notar las distintas distribuciones de intensidad obtenidas tanto para el vidrio despulido como para la fibra óptica multimodo del campo emergente de éstas. En dichas figuras se observa una diferencia en la caída de intensidad lumínica para las dos distribuciones, siendo el histograma debido al vidrio esmerilado más fiel al histograma dado por la teoría para una distribución aleatoria del campo, ya que se asemeja más a una función exponencial decreciente. Asimismo, se puede notar que el histograma correspondiente a la fibra óptica no presenta de manera pronunciada el carácter decreciente de la función exponencial, lo cual nos lleva a pensar que el grado de aleatoriedad que presenta la fibra óptica debido a la mezcla de modos en su núcleo, no es tan alto comparado con el grado de aleatoriedad que presenta el vidrio esmerilado.

# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

Sabemos que cuando el patrón de interferencia-difracción es observado cerca a una estructura difractiva, es muy probable que se esté trabajando en la región de Fresnel o campo cercano, debido a que los rayos de luz que atraviesan la abertura no pueden considerarse paralelos. Éste fenómeno es muy difícil de analizar matemáticamente y por tanto nos ceñiremos a aspectos meramente cualitativos del mismo.

Realizar un análisis de la Difracción de fresnel y la Difracción de Fraunhofer de un campo óptico es conveniente cuando se tiene un par de aberturas que ilustran un buen interferómetro basado en el experimento de Young. De la misma forma, son muy útiles los criterios definidos con los valores  $N_i$  y  $N_e$  vistos al final del Capítulo 2 (los cuales son independientes de la forma de las aberturas y del grado de coherencia espacial que posea la luz). Es de anotar, que existen criterios mas refinados para la obtención de los parámetros mencionados anteriormente, pero en nuestro caso como se analizará mas adelante, los valores encontrados para  $N_i$  y  $N_e$  logran superar en demasía la cota superior que tendría el valor de 1 para cada caso.

Con la ayuda de la ecuación 2.17, se encontró que el tamaño transversal del speckle objetivo generado por el difusor era de  $20 \mu\text{m}$  a una distancia de  $30.0 \text{ mm}$  medidos desde la fuente hasta el plano de observación (esta distancia es la distancia mínima entre estos dos puntos en la cual se hizo un registro). El tamaño del píxel de la cámara SONY modelo No SSC-M370 es de  $9 \mu\text{m}$ , por lo que no hubo problema con la resolución del speckle a una distancia de  $30.0 \text{ mm}$ ; además, es de tener en cuenta que en el camino entre la fuente y la CCD, se encontraba el plano de las aberturas, que al difractar el campo que pasa a través de ella, logra que el tamaño del speckle aumente un poco mas. Ahora, si pensamos en el tamaño transversal del speckle generado por la fibra, claramente este supera los  $20 \mu\text{m}$  del speckle del difusor, ya que a simple vista se logra observar que el tamaño del speckle es mayor para la fibra óptica. Como se observa en la figura 3.4 y 3.5, las funciones de distribución que siguen tanto el vidrio como la fibra

son distintas, por lo tanto, la estadística de segundo orden que da información acerca del tamaño promedio de un speckle difiere en ambas. La estadística de segundo orden desarrollada en la literatura para un patrón de speckle completamente desarrollado (que sigue una distribución exponencial), suministra la ecuación 2.17 para encontrar el tamaño promedio del speckle, en este orden de ideas no es apropiado usar la misma ecuación para un speckle que esta regido por una estadística distinta como lo es el de la fibra. Claramente en las figuras 3.4 y 3.5, se observa que manteniendo las condiciones geométricas del sistema para ambos casos, el tamaño de speckle varía con la fuente que origina la aleatoriedad del campo; además, vemos que la distribución de intensidad tanto para el campo aleatorio generado por el vidrio esmerilado como para el campo aleatorio generado por la fibra óptica multimodo, se comporta de la siguiente forma:

- Para el caso del vidrio esmerilado, la distribución de intensidad (figura 3.4), es semejante a la función exponencial de la figura 4.7 donde podemos decir que se tiene un speckle completamente desarrollado dada la caída de la curva, ya que la curva obedece a una función exponencial decreciente.
- Para el caso de la fibra óptica, la distribución de intensidad de la figura 3.5 al ser comparada con la figura 4.7 no tiene una caída igual a la de una función exponencial negativa, por lo que se puede decir que el speckle generado por la fibra óptica no es completamente desarrollado, y por tanto no obedecen la misma estadística. Esta distribución de intensidad de la fibra es similar a la mostrada en la figura 2.12 (a) para el caso de la curva D, donde se tiene una curva un poco mas achatada que las anteriores debido a la longitud de la fibra óptica. En nuestro caso la longitud de la fibra es aproximadamente 180. 0 cm por lo cual el máximo valor que alcanza la curva disminuye aún mas. Este resultado se puede contrastar con el trabajo realizado por Chen-Hao P. Lin, Inema Orukari, Christopher Tracy, Lisa Kobayashi Frisk, Manish Verma, Sumana Chetia, Turgut Durduran, Jason W. Trobaugh, and Joseph P. Culver, llamado "Multi-mode fiber-based speckle contrast optical spectroscopy: analysis of speckle statistics" [16], donde se observa que la distribución de intensidad seguida por una fibra óptica multimodo presenta un mejor ajuste con una distribución gamma. Este resultado es coherente con el análisis realizado por Goodman en el trabajo "Statistical Properties of Laser Speckle Patterns", donde se muestra que la intensidad medida sobre un detector debida a un patrón de speckle pueden seguir distribuciones distintas, estas pueden variar como una exponencial negativa, una función gaussiana y una función gamma; esta variación dependerá de la correlación existente entre la cantidad de Speckle y el tamaño del detector. Por lo anterior, podemos ver que no solo la estadística del speckle cambia debido a la forma en la cual se genere dicho speckle (sea generado por una fibra multimodo o por un vidrio), sino que también la estadística dependerá

del detector usado, ya que existe una correlación entre el tamaño promedio del speckle y el tamaño del pixel del detector.

A continuación se presentaran los registros obtenidos para las distintas estructuras de iluminación. Se debe recordar que el parámetro  $a$  se mantuvo fijo en todo el proceso, tomando un valor de 10.0 mm. En la última columna de cada tabla se puede observar la simulación correspondiente a cada estructura difractiva realizada en Python; además, según los criterios vistos en el capítulo 2 con los valores de  $N_i$  y  $N_e$  se pueden definir tres zonas que nos darán cuenta de la zona en la cual se encuentra el plano de observación. Teniendo en cuenta estas condiciones y la ecuación 2.10 se pueden obtener los valores para  $N_i$  y  $N_e$  reportados en las tablas 4.1, 4.4 y 4.6 para las distintas estructuras de iluminación (donde  $a \rightarrow \infty$  para el caso del frente de onda plano y para los demás casos se tiene que  $a = 10.0$  mm).

## 4.1. Patrones de interferencia-difracción generados por aberturas circulares

En esta primera fase se hace incidir directamente el frente de onda plano sobre las aberturas circulares que se muestran en la figura 3.2 (a) para obtener un patrón de interferencia-difracción como referencia. Luego de esto se varía la estructura de iluminación con la ayuda del vidrio esmerilado y finalmente se realiza la misma toma de imágenes con la fibra óptica. El parámetro  $b$  (distancia entre la máscara y el plano de observación) se varió para 20.0 y 40.0 mm. Además, se utilizaron distintos tamaños tanto para las aberturas circulares como para la separación entre ellas. Ver Tabla 4.2 y 4.3.

En primer lugar analizaremos el patrón de interferencia-difracción debido a la máscara con dos aberturas circulares (ver Tabla 4.2 y 4.3). En las imágenes de la primera fila de la Tabla 4.2 se observa para el caso del frente de onda plano, un patrón de interferencia-difracción donde no es posible conocer la forma geométrica de la abertura difractiva; lo anterior se puede corroborar con el valor obtenido para  $N_i$  y  $N_e$  cumpliéndose el caso 2 para la zona de transición donde  $N_i < 1$  y  $N_e > 1$  (ver Tabla 4.1). Caso diferente es el de la fibra óptica donde (para la misma máscara) y con distancias  $b$  iguales al caso anterior, se puede prever la forma de la estructura difractiva, donde los valores obtenidos tanto para  $N_i$  como para  $N_e$  son superiores a 1, de donde resulta que el plano de observación estaría ubicado en la región de Fresnel [16].

Para las imágenes (a) y (b) referentes a la fibra, donde se superponen las proyecciones de los campos provenientes de las dos aberturas circulares, existe una modulación central en cada imagen para cada speckle. Cada mota del patrón originado por la fibra ubicado en la zona de central del plano de observación, presenta una interferencia que da cuenta de la orientación o disposición de las dos aberturas. La interferencia de estos

frentes de onda aleatorios dentro de cada speckle se asemeja a las franjas de Young para el caso de una doble rendija, debido a que se observa un patrón vertical (paralelo al plano de la aberturas como se observa en la sección 2.3 del Capítulo 2) haciéndose mas notable en el caso (b) ya que los campos se superponen aun mas debido a que el plano de observación se encuentra a una distancia mayor que en el caso (a) respecto a la estructura difractiva.

La simulación del esquema anterior con el par de aberturas circulares, corrobora la observación hecha en la parte experimental, donde de igual forma se observa una interferencia en la zona central del patrón. La simulación se realizó generando un campo con una fase completamente aleatoria, de esta forma se buscó reproducir los patrones generados por el vidrio y se observó que los resultados eran similares a los patrones generados por la fibra óptica. Comparando las imagenes de los patrones generados por el vidrio y por la simulación, es claro que en la simulación para distancias muy pequeñas (del orden de centímetros), el campo no se difracta lo suficiente en comparación con el vidrio, por lo cual, el campo que emerge de cada abertura no alcanza a superponerse a distancias cortas, mientras que en el vidrio, los campos emergentes de las aberturas si lo hacen (el vidrio al tener una rugosidad tan pequeña permitía que el campo tuviera una difracción mayor que el campo emergente de la fibra). Lo anterior nos permite deducir que al trabajar con una simulación donde se busquen reproducir resultados como los mencionados anteriormente, se debe tener en cuenta que, para que los campos que emergen de un par de aberturas interfieran en el espacio, la distancia al plano de observación debe ser mayor a la experimental, logrando así que los campos se superpongan completamente. Además, es de tener en cuenta que al incrementar la distancia de observación, el speckle aumenta su tamaño por lo tanto es indispensable en la simulación, agrandar el tamaño de la matriz manteniendo el tamaño del píxel.

En segundo lugar, se puede notar que para el caso del frente de onda plano, a diferencia del caso anterior donde se tenían las dos aberturas circulares con una separación y un diámetro igual a 0.2 mm, y para los casos siguientes (ver filas 2 y 3 de la Tabla 4.2 y filas 1 y 2 de la Tabla 4.3) es posible predecir con el patrón de interferencia-difracción la forma geométrica de una abertura individual y la disposición de las dos aberturas en el plano de la máscara, ya que los valores  $N_i$  y  $N_e$  superan la cota igual a 1 (ver Tabla 4.1). Para las imágenes de la fibra óptica y las obtenidas a través de la simulación (ver filas 2 y 3 de la Tabla 4.2 y filas 1 y 2 de la Tabla 4.3), se observa que el moteado en la región central de la imagen adquiere una forma alargada (como en el caso de la fila 1) en dirección perpendicular a la ubicación de las dos aberturas respecto al eje óptico. La superposición de patrones de speckle en la región central de la imagen da como resultado un nuevo patrón de speckle donde la orientación del grano es un referente de la distribución de las aberturas.

Para finalizar, se observa que para todos los casos, la forma de la abertura es incierta a medida que aumenta el tamaño de la misma. Lo anterior se da debido al área de dispersión del campo y a que el tamaño del speckle se ve influenciado por la abertura que lo difracta, mientras más pequeña sea la abertura mayor será el diámetro asociado a este moteado, lo cual se deduce de la ecuación 2.17. Ahora, si comparamos las imágenes del vidrio y la fibra óptica se observan diferencias. Para las imágenes del vidrio despulido no es visible la zona donde se intersecan las proyecciones de las aberturas, pero si es posible ver el alargamiento del speckle en todas la imágenes; para la fibra, aún se puede visualizar la zona de superposición. Esto último es debido al grado de dispersión que presenta el haz luego de atravesar el vidrio esmerilado, caso contrario a la fibra donde el haz emergente de esta presenta un grado de dispersión menor.

Para el vidrio esmerilado no se tienen imágenes en la primera y segunda fila ya que la visibilidad del patrón era casi nula.

<b>Estructura de iluminación</b>	$D = 0.2mm$ y $S = 0.2mm$	$D = 0.4mm$ y $S = 0.4mm$	$D = 0.6mm$ y $S = 0.5mm$	$D = 0.8mm$ y $S = 0.5mm$	$D = 1.1mm$ y $S = 0.6mm$
<b>Onda plana</b>	(a) $N_i = 0.8$ $N_e = 7.0$	(a) $N_i = 3.0$ $N_e = 28.0$	(a) $N_i = 7.0$ $N_e = 57.0$	(a) $N_i = 13.0$ $N_e = 87.0$	(a) $N_i = 24.0$ $N_e = 155.0$
	(b) $N_i = 0.4$ $N_e = 3.0$	(b) $N_i = 1.5$ $N_e = 14.0$	(b) $N_i = 3$ $N_e = 28.0$	(b) $N_i = 6$ $N_e = 43.0$	(b) $N_i = 12$ $N_e = 77.0$
<b>Vidrio esmerilado, Fibra óptica</b>	(c) $N_i = 0.1$ $N_e = 21.0$	(c) $N_i = 9.0$ $N_e = 85.0$	(c) $N_i = 21.0$ $N_e = 171.0$	(c) $N_i = 38.0$ $N_e = 261.0$	(c) $N_i = 71.0$ $N_e = 464.0$
	(d) $N_i = 2.0$ $N_e = 18.0$	(d) $N_i = 8.0$ $N_e = 71.0$	(d) $N_i = 18.0$ $N_e = 142.0$	(d) $N_i = 31.0$ $N_e = 217.0$	(d) $N_i = 60.0$ $N_e = 387.0$

Tabla 4.1: Valores obtenidos de  $N_i$  y  $N_e$  para las aberturas circulares. Todos los valores encontrados indican que el plano de observación se encuentra en el campo cercano o de Fresnel, a excepción del valor  $N_i$  para el primer par de aberturas circulares que indica que el plano de observación se encuentra en la zona de transición para la onda plana, el vidrio esmerilado y la fibra óptica. D y S corresponden al ancho y la separación entre las aberturas respectivamente.

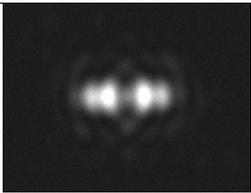
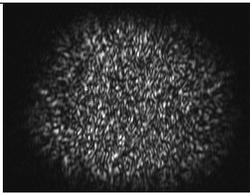
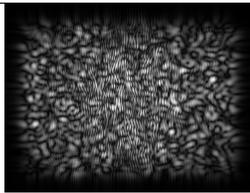
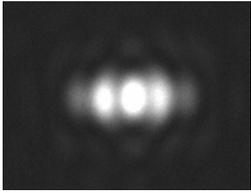
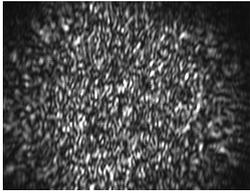
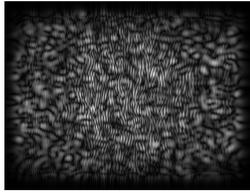
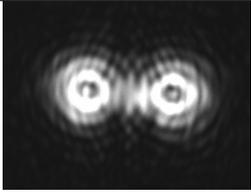
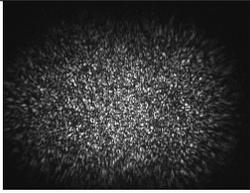
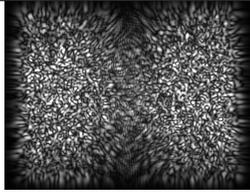
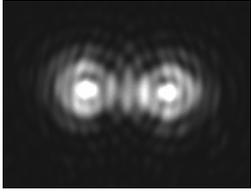
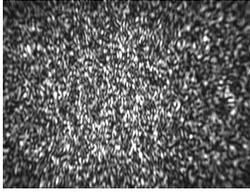
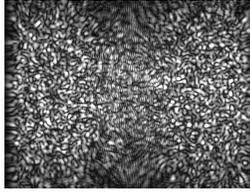
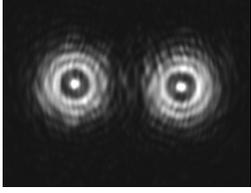
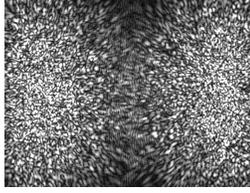
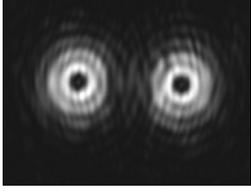
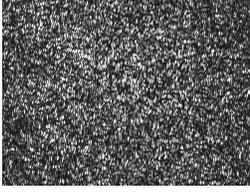
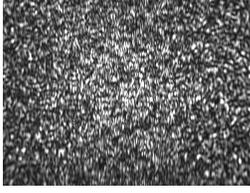
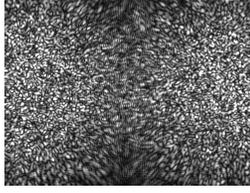
Onda plana	Vidrio esmerilado	Fibra óptica	Simulación
 (a)		 (a)	 (a)
 (b)		 (b)	 (b)
 (a)		 (a)	 (a)
 (b)		 (b)	 (b)
 (a)	 (a)	 (a)	 (a)
 (b)	 (b)	 (b)	 (b)

Tabla 4.2: Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de aberturas circulares. El diámetro y separación de cada abertura circular fue respectivamente: Fila 1  $\rightarrow$  (0.2 mm y 0.2 mm), Fila 2  $\rightarrow$  (0.4 mm y 0.4 mm) y Fila 3  $\rightarrow$  (0.6 mm y 0.5 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara. Las imágenes del vidrio esmerilado para las dos primeras aberturas no se reportaron ya que la intensidad del campo sobre la CCD era muy tenue para ser captada.

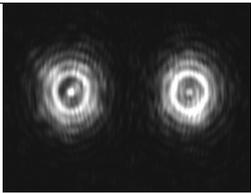
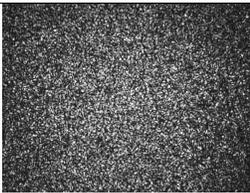
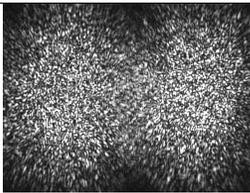
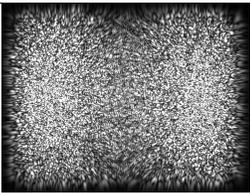
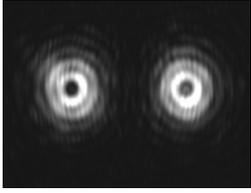
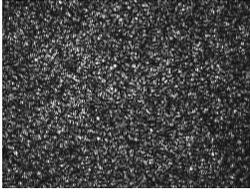
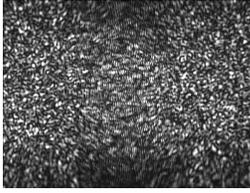
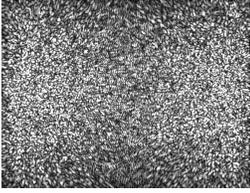
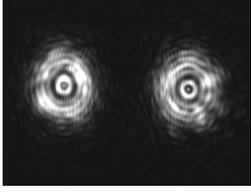
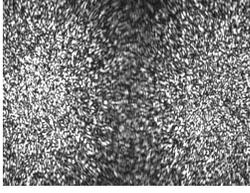
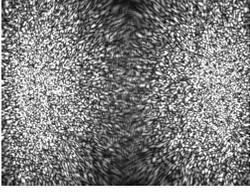
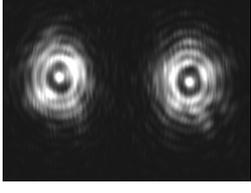
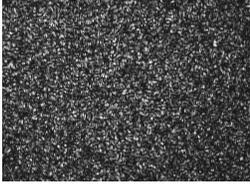
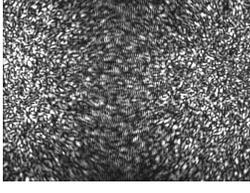
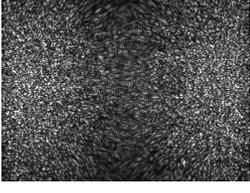
Onda plana	Vidrio esmerilado	Fibra óptica	Simulación
 (a)	 (a)	 (a)	 (a)
 (b)	 (b)	 (b)	 (b)
 (a)	 (b)	 (a)	 (a)
 (b)	 (b)	 (b)	 (b)

Tabla 4.3: Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de aberturas circulares. El diámetro y separación de cada abertura circular fue respectivamente de: Fila 1→(0.8 mm y 0.5 mm) y Fila 2→(1.1 mm y 0.6 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara.

## 4.2. Patrones de interferencia-difracción generados por aberturas cuadradas

Análogamente a la primera fase, se hace incidir directamente el frente de onda plano sobre las aberturas cuadradas que se muestran en la figura 3.2 (b) para obtener un patrón de interferencia-difracción como referencia. Luego de esto se varía la estructura de iluminación con la ayuda del vidrio esmerilado y finalmente se realiza la misma toma de imágenes con la fibra óptica. El parámetro  $b$  (distancia entre la máscara y el

plano de observación) se varió para 20.0 y 40.0 mm. En este caso, se utilizaron dos separaciones diferentes entre las aberturas manteniendo el ancho de las mismas.

En esta sección de imágenes se tiene que tanto para la fila 1 como para la fila 2 de la Tabla 4.5, las imágenes pertinentes a la onda plana, los campos no presentan superposición, observándose claramente la forma geométrica de la abertura individual y su distribución, lo cual se logra corroborar con los valores para  $N_i$  y  $N_e$  mostrados en la tabla 4.4 (donde se tiene que el plano de observación se encuentra en la zona de Fresnel).

Pasando a los registros de la fila 1 (para el caso del vidrio esmerilado, la fibra óptica y la simulación) nuevamente se observa la modulación del speckle siendo mas notable el cambio de la forma del grano en las imágenes correspondientes a la fibra óptica y la simulación de la misma. De igual forma se observa la modulación interna de cada moteado debido a la interferencia de los campos en la región donde ambos se alcanzan a superponer. En la fila 2, se observa para el caso del difusor, como la luz sufre una gran dispersión ya que no se distingue la existencia de las dos aberturas cuadradas y ambos campos (provenientes de cada abertura) se alcanzan a superponer casi en su totalidad; caso contrario a lo que se puede notar para la fibra y la simulación ya que aún los dos patrones de difracción debidos a cada abertura no alcanzan a superponerse (Para el caso de la fila 2, la separación entre las aberturas cuadradas es mayor que en la fila 1). Finalmente se logró observar la misma situación de la simulación del caso de las aberturas circulares, donde la simulación coincide mas con los resultados de la fibra que con el caso del vidrio.

<b>Estructura de iluminación</b>	$D = 1.2mm$ y $S = 2.0mm$	$D = 1.2mm$ y $S = 2.5mm$
<b>Onda plana</b>	(a) $N_i = 28.0$ $N_e = 382.0$ (b) $N_i = 14.0$ $N_e = 191.0$	(a) $N_i = 28.0$ $N_e = 474.0$ (b) $N_i = 14.0$ $N_e = 237.0$
<b>Vidrio esmerilado, Fibra óptica</b>	(c) $N_i = 85.0$ $N_e = 1,146.0$ (b) $N_i = 71.0$ $N_e = 955.0$	(c) $N_i = 85.0$ $N_e = 1,422.0$ (b) $N_i = 71.0$ $N_e = 1,185.0$

Tabla 4.4: Valores obtenidos de  $N_i$  y  $N_e$  para las máscaras con las aberturas cuadradas. Todos los valores encontrados indican que el plano de observación se encuentra en el campo cercano o de Fresnel. D y S corresponden al ancho y la separación entre las aberturas respectivamente.

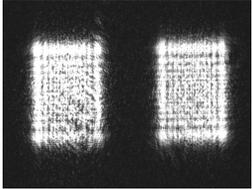
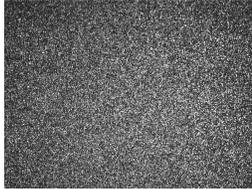
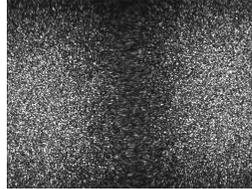
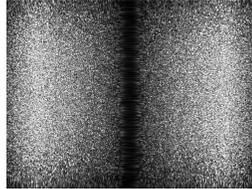
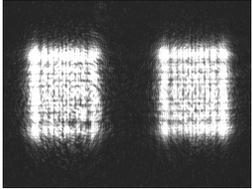
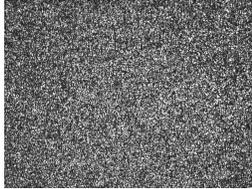
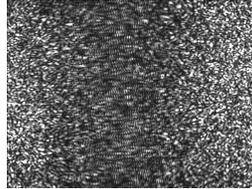
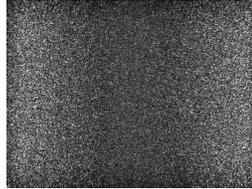
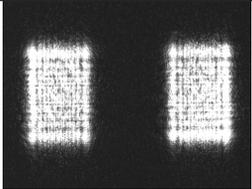
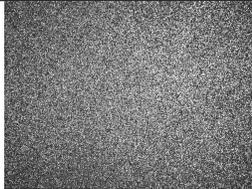
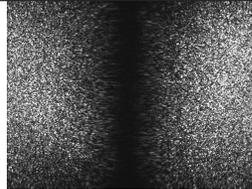
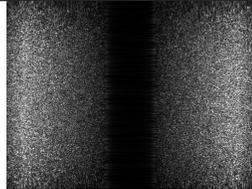
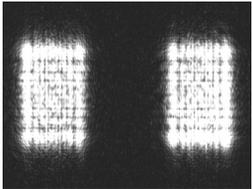
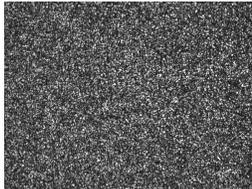
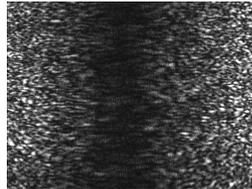
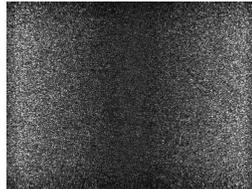
Onda plana	Vidrio esmerilado	Fibra óptica	Simulación
 (a)	 (a)	 (a)	 (a)
 (b)	 (b)	 (b)	 (b)
 (a)	 (a)	 (a)	 (a)
 (b)	 (b)	 (b)	 (b)

Tabla 4.5: Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de aberturas cuadradas. El ancho y separación de cada abertura fue respectivamente de: Fila 1  $\rightarrow$  (1.2 mm y 2.0 mm) y Fila 2  $\rightarrow$  (1.2 mm y 2.5 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara.

### 4.3. Patrones de interferencia-difracción generados por un par de rendijas

Para finalizar el registro de imágenes, nuevamente se hace incidir directamente el frente de onda plano sobre un par de rendijas como se muestra en la figura 3.2 (c) para obtener un patrón de interferencia-difracción como referencia. Luego de esto se varía la estructura de iluminación con la ayuda del vidrio esmerilado y finalmente se realiza la misma toma de imágenes con la fibra óptica. Nuevamente el parámetro  $b$  (distancia

entre la máscara y el plano de observación) se varió para 20.0 y 40.0 mm. Además, se utilizaron diferentes separaciones entre las rendijas, manteniendo el ancho de las mismas. Ver Tabla 4.7

Dados que los valores obtenidos para  $N_i$  y  $N_e$  (ver tabla 4.6) superan el valor de 1, de acuerdo a los criterios ya vistos se tiene nuevamente que la zona en la que se encuentra el plano de observación es la zona de fresnel. Para la fila 1 de la Tabla 4.7 se tiene que las imágenes registradas para la onda plana nos proporciona información acerca de las propiedades geométricas de las estructuras difractivas. Así mismo, las imágenes tanto del vidrio despulido como de la fibra óptica mostradas en la misma fila, evidencian el comportamiento ya mencionado del speckle (modulación interna de cada speckle) siendo mas visible en los registros de la fibra óptica. Conviene subrayar que la modulación del speckle debido al vidrio tiene una orientación igual a la mostrada en el patrón de interferencia-difracción debido a la fibra óptica, pero el tamaño del moteado permite que esta modulación sea mas visible en la fibra (en todas las imagenes de las Tablas 4.3, 4.5 y 4.7 se observa a simple vista que el tamaño transversal del speckle es mayor en la fibra óptica que en el difusor). Al igual que en el caso de las aberturas circulares y las aberturas cuadradas, los resultados de la simulación se asemejan más a los patrones de la fibra.

A través del patrón de interferencia observado dentro de cada speckle, se puede discernir la orientación de las rendijas respecto al patrón registrado en el plano de observación. Como la interferencia se registra como un patrón horizontal, esto nos indica que las rendijas estan orientadas de forma vertical, es decir, el lado mas ancho de las rendijas es perpendicular a la dirección del patrón de interferencia.

<b>Estructura de iluminación</b>	$D = 0.1mm$ y $S = 0.15mm$	$D = 0.1mm$ y $S = 0.175mm$	$D = 0.1mm$ y $S = 0.2mm$
<b>Onda plana</b>	(a) $N_i = 0.8$ $N_e = 2.4$	(a) $N_i = 0.8$ $N_e = 2.7$	(a) $N_i = 0.8$ $N_e = 3$
	(b) $N_i = 0.4$ $N_e = 1.2$	(b) $N_i = 0.4$ $N_e = 1.3$	(b) $N_i = 0.4$ $N_e = 1.5$
<b>Vidrio esmerilado, Fibra óptica</b>	(c) $N_i = 2.0$ $N_e = 7.0$	(c) $N_i = 2.0$ $N_e = 8.0$	(c) $N_i = 2.0$ $N_e = 9.0$
	(d) $N_i = 1.9$ $N_e = 6.0$	(d) $N_i = 1.9$ $N_e = 7.0$	(d) $N_i = 1.9$ $N_e = 8.0$

Tabla 4.6: Valores obtenidos de  $N_i$  y  $N_e$  para las máscaras con las rendijas. Todos los valores encontrados indican que el plano de observación se encuentra en el campo cercano o de Fresnel, a excepción del valor  $N_i$  que indica que el plano de observación se encuentra en la zona de transición para la onda plana en los tres pares de rendijas. D y S corresponden al ancho y la separación entre las aberturas respectivamente.

Finalmente se puede observar en las imágenes referentes al difusor y a la fibra óptica, el tamaño del moteado y la estadística del campo, condiciona el patrón de interferencia-difracción. Cada speckle producto de la superposición de los dos campos provenientes de cada abertura, presenta una modulación interna característica de la interferencia de dos campos coherentes sobre una doble abertura, comúnmente conocida como el patrón de interferencia del experimento de Young. En la región del patrón donde hay una superposición de los campos (debidos a cada abertura), se ve claramente (Figura 4.1) que cada speckle es dividido en tres lóbulos brillantes donde hay interferencia constructiva, siendo más notable este efecto para el caso de la fibra óptica que para el vidrio. Esta diferencia en la visibilidad del fenómeno de interferencia dentro de cada speckle, se debe a que el tamaño medio de este es mayor en la fibra que en el difusor, por lo tanto la interferencia es más visible en el patrón generado por la fibra. Vemos finalmente, que aunque el fenómeno de interferencia se da tanto en los patrones generados por el vidrio y la fibra, esta es más notable en los patrones generados por la fibra óptica ya que el tamaño del speckle contribuye en una mejor visibilidad del mismo.

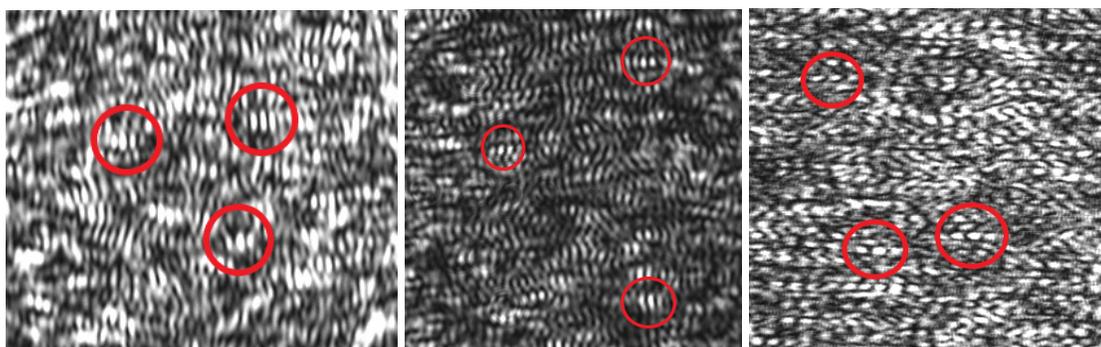


Figura 4.1: Acercamiento de la zona central de los patrones de speckle generados por la fibra óptica multimodo para una doble abertura circular, doble abertura cuadrada y doble rendija (de izquierda a derecha).

Como se mencionó anteriormente, en las tres Tablas (a excepción de la fila 1 Tabla 4.2) todos los patrones de interferencia-difracción obtenidos están en la zona de Fresnel o campo cercano. Por tanto, según la teoría vista en el Capítulo 2, sería posible discernir la forma de la estructura difractiva, pero como vimos, no es posible en algunos casos debido a la dispersión del campo.

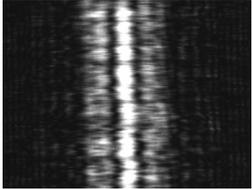
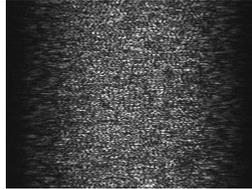
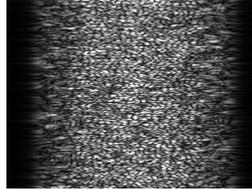
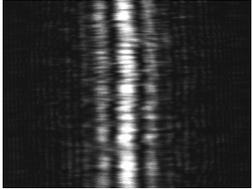
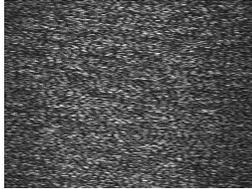
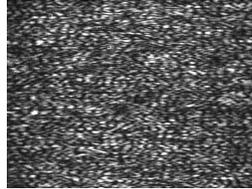
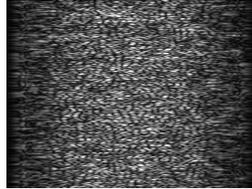
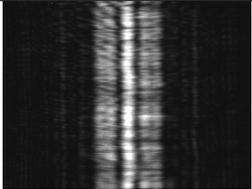
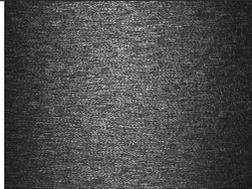
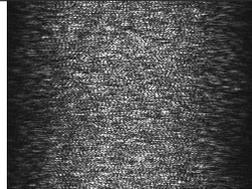
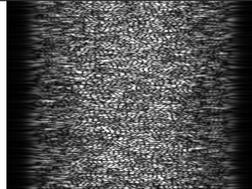
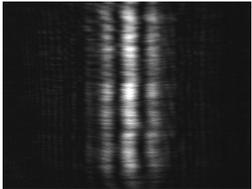
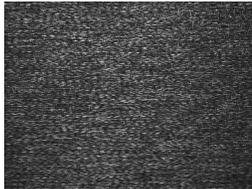
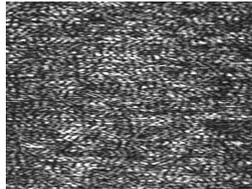
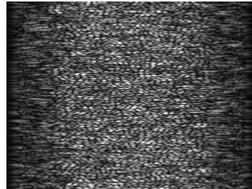
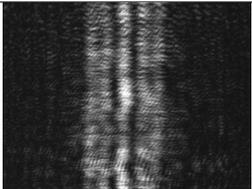
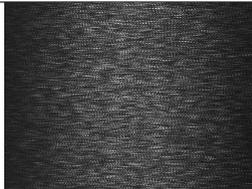
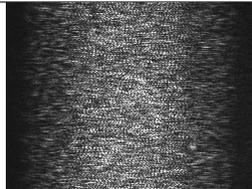
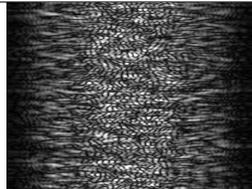
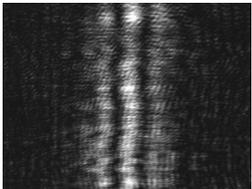
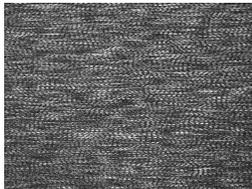
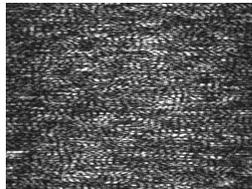
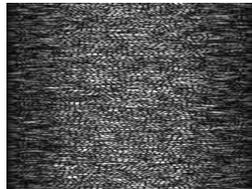
Onda plana	Vidrio esmerilado	Fibra óptica	Simulación
			
(a)	(a)	(a)	(a)
			
(b)	(b)	(b)	(b)
			
(a)	(a)	(a)	(a)
			
(b)	(b)	(b)	(b)
			
(a)	(a)	(a)	(a)
			
(b)	(b)	(b)	(b)

Tabla 4.7: Patrones de interferencia-difracción generados a 20.0 y 40.0 mm de la estructura difractiva por un par de rendijas. El ancho y separación de cada rendija fue respectivamente de: Fila 1→(0.1 mm y 0.15 mm), Fila 2→(0.1 mm y 0.175 mm) y Fila 3→(0.1 mm y 0.2 mm). Cada imagen (a) corresponde a un plano de observación ubicado a 20.0 mm del plano de la máscara y cada imagen (b) corresponde a un plano de observación ubicado a 40.0 mm de la máscara

# Capítulo 5

## Conclusiones

Todo el análisis realizado en el capítulo anterior nos lleva a concluir lo siguiente:

- Los parámetros  $N_i$  y  $N_e$  son importantes a la hora de determinar la zona sobre la cual se está generando el patrón de difracción-interferencia debido a la estructura individual o por una estructura compleja. Además, dan cuenta de la forma geométrica de la distribución espacial de la estructura difractiva. Una forma de conocer si el efecto de interferencia prevalece sobre el efecto de difracción o viceversa es conociendo de igual forma dichos parámetros. Como vimos, el efecto de interferencia es claramente visible en la mayoría de los casos a pesar que el valor de  $N_e > 1$ .
- La superposición de patrones de speckle da como resultado un nuevo patrón de speckle donde la orientación del grano es un referente de la distribución espacial de las aberturas. Tanto en las imágenes obtenidas para las aberturas circulares, las aberturas cuadradas y las rendijas, se observa que la superposición de los dos patrones de difracción modifica el speckle, generando franjas de interferencia dentro de cada moteado; la dirección de las franjas permite deducir la distribución espacial del par de aberturas.
- En todas las imágenes relacionadas en el capítulo anterior, se puede notar que el tamaño de las motas generadas por el vidrio esmerilado y por la fibra óptica es diferente (siendo mayor en el caso de la fibra) lo cual hace que la visibilidad del fenómeno de interferencia sea más notable para la fibra óptica (Figura 4.1). La ecuación 2.17 referente al tamaño promedio del speckle es apropiada para un campo aleatorio completamente desarrollado pero no para un campo aleatorio parcialmente desarrollado, ya que las estadísticas de ambos difieren claramente (figura 3.4 y 3.5). Por lo anterior, se le ha dado respuesta a la pregunta planteada en la introducción del trabajo ¿Qué está pasando con el patrón de interferencia-difracción cuando la aleatoriedad del campo proviene de una mezcla de modos

debido a una fibra óptica?, la respuesta es el tamaño medio del speckle (la interferencia es mas notable en el patrón generado por la fibra debido a la visibilidad de las franjas dentro de cada grano). Teniendo en cuenta el análisis anterior, una nueva línea de investigación interesante sería estudiar cómo varía el tamaño del speckle para diferentes distribuciones aleatorias del campo.

- Los resultados de la simulación corroboran la observación hecha en la parte experimental, donde de igual forma se observa una interferencia en la zona central del patrón. Ya que los resultados de la simulación realizada (con el propagador de Fresnel (TF) del campo), coinciden mas con los patrones de interferencia-difracción de la fibra óptica, dicha simulación tendría un uso apropiado en el caso de contrastar resultados experimentales con fibras ópticas multimodo. Para simular (con el mismo propagador) el caso de un vidrio esmerilado con una rugosidad muy pequeña, el plano de observación se debe alejar demasiado del plano de las aberturas y se debe agrandar la matriz manteniendo un tamaño fijo de píxel.
- El cambio entre un patrón de difracción de Fraunhofer y un patrón de difracción de Fresnel no solo depende del número de zonas, sino de la naturaleza de la fuente, es decir, para un campo con una distribución aleatoria de intensidad, vemos que el fenómeno de interferencia es visible no solo en el campo lejano sino también en el campo cercano. En el 5 se pueden observar los patrones de interferencia-difracción generados al iluminar distintas estructuras como lo son: una rendija, una doble rendija y una rejilla (con 14 rendijas) con un campo aleatorio emergente de la fibra óptica multimodo(MAXELL). La interferencia es notable en el campo cercano y en el campo lejano debido al tamaño del speckle emergente de la fibra (se tomaron registros del patrón de interferencia-difracción hasta una distancia igual a 100.0 mm entre la estructura difractiva y la CCD).
- Debido a que los patrones de interferencia-difracción son mas notables con el campo generado por la fibra, este elemento óptico de bajo costo y por lo tanto asequible sería de utilidad a la hora de conocer detalles de una estructura difractiva.

# Apéndice

A continuación se podrán visualizar los patrones de interferencia-difracción generados al iluminar distintas estructuras como lo son: una rendija, una doble rendija y una rejilla (con 14 rendijas) con un campo aleatorio emergente de la fibra óptica multimodo(MAXELL):

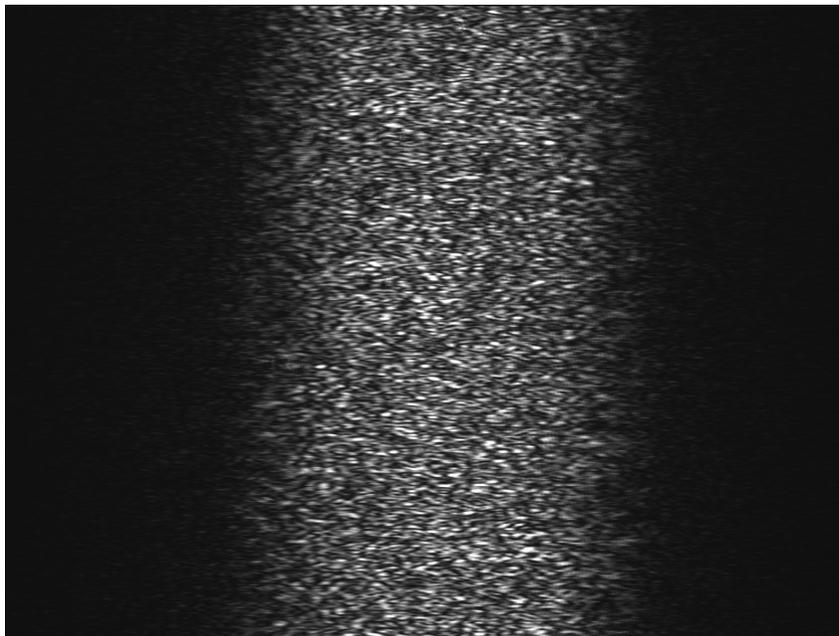


Figura 5.1: **Una rendija:** Patrón de interferencia-difracción generado por una rendija a una distancia  $b = 20.0$  mm respecto a la estructura difractiva. Ancho de la rendija =  $0.2$  mm.

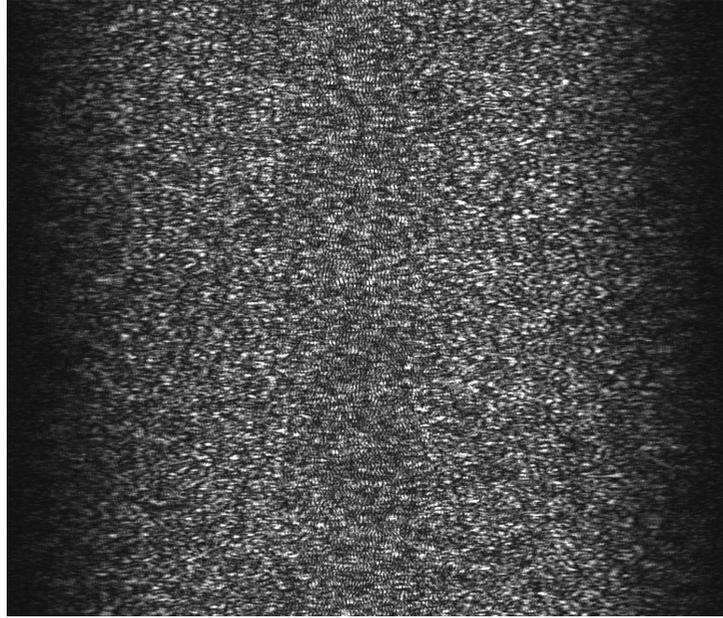


Figura 5.2: **Doble rendija:** Patrón de interferencia-difracción generado por una doble rendija a una distancia  $b = 20.0$  mm respecto a la estructura difractiva. Ancho de las rendijas =  $0.02$  mm, separación entre las rendijas =  $0.03$  mm.

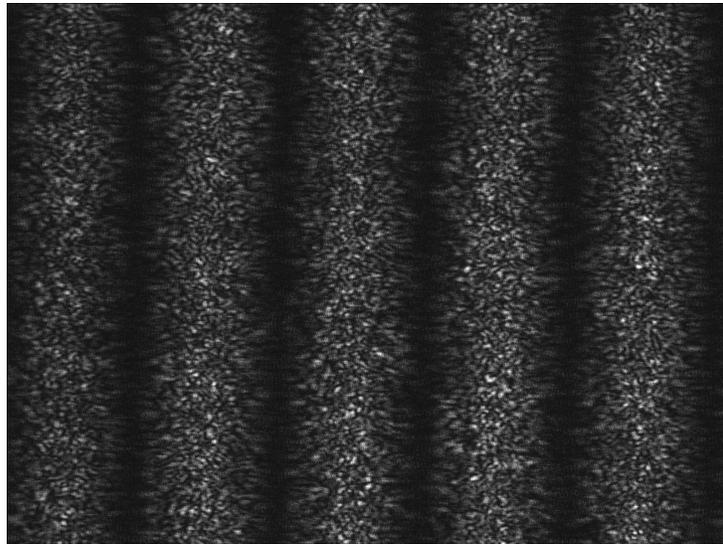


Figura 5.3: **Rejilla:** Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia  $b = 20.0$  mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas.

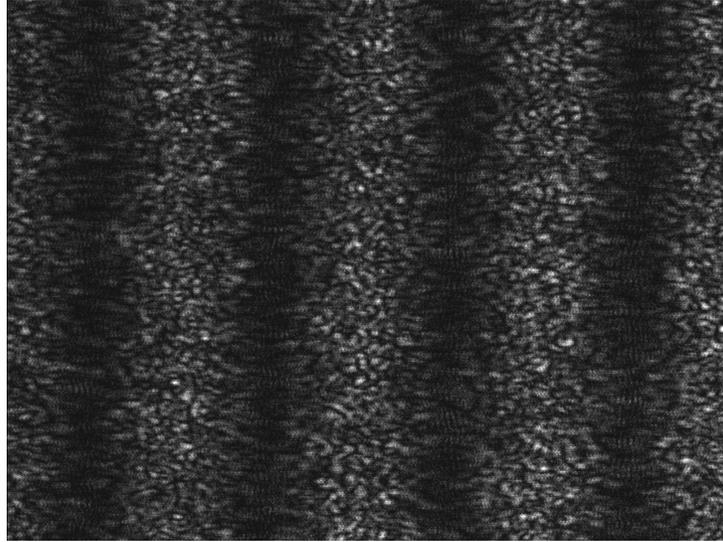


Figura 5.4: **Rejilla:** Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia  $b = 20.0$  mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas.

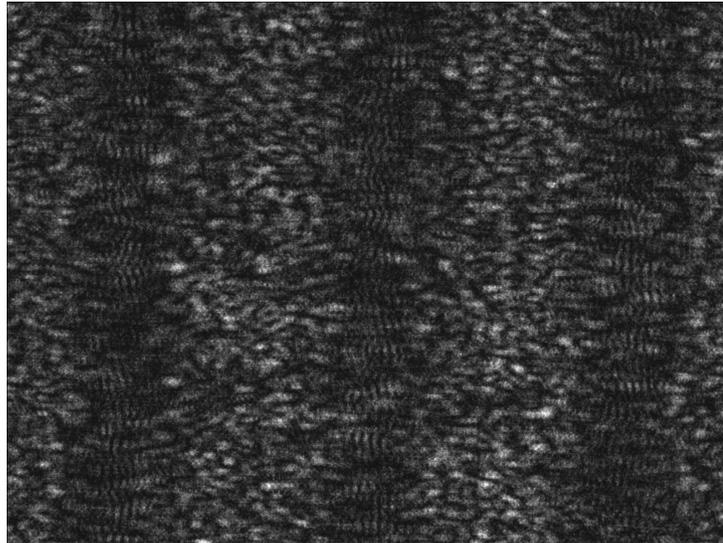


Figura 5.5: **Rejilla:** Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia  $b = 60.0$  mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas.

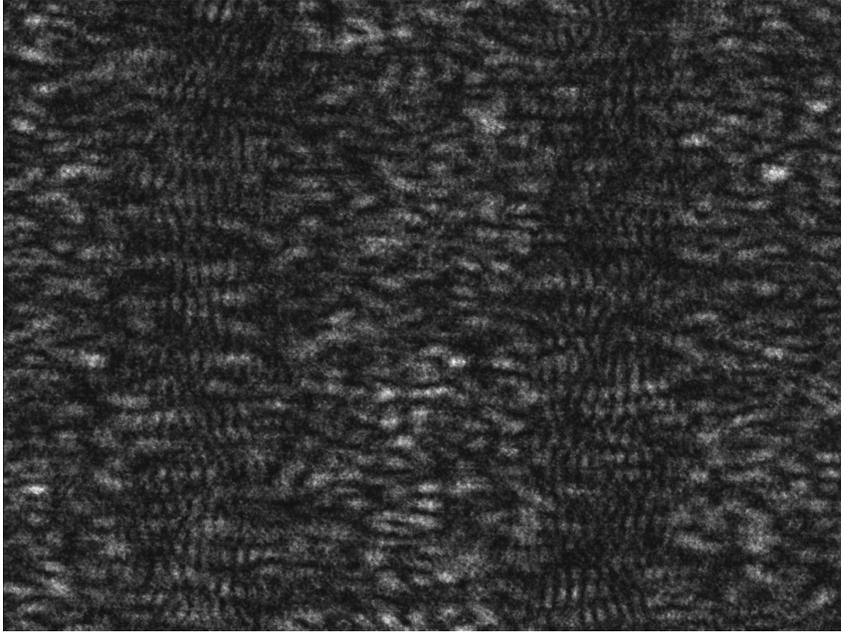


Figura 5.6: **Rejilla:** Patrón de interferencia-difracción generado por una rejilla a una distancia  $b = 100.0$  mm respecto a la estructura difractiva. La rejilla está compuesta por 14 rendijas.

# Bibliografía

- [1] R. Henao, A. Mejía, "Análisis de la calidad de franjas en Interferometría speckle", *Revista Colombiana de Física*, Vol. 34 No. 2 (2002).
- [2] L. Toro, M. Tebaldi, M. Trivi, N. Bolognini, "Optical operations based on speckle modulation by using a photorefractive crystal", *Optics Communications* 168(1999) 55p.
- [3] M. Tebaldi, A. Lencina, N. Bolognini, "Analysis and applications of the speckle patterns registered in a photorefractive BTO crystal", *Optics Communications*. 202 (2002) 257p.
- [4] D. Gómez, D. Sierra, R. Castañeda, L. Angel, "Effect of the internal modulation of speckles in displacement measurements in optical vortex metrology", *Proc. of SPIE* Vol. 8785 87858C-1
- [5] Lester I. Goldfisher, "Autocorrelation Function and Power Spectral Density of Laser-Produced Speckle Patterns", *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA*, Vol. 55 No. 3 (1965).
- [6] B. Crosignani, B. Daino, and P. Di Porto, "Speckle-pattern visibility of light transmitted through a multimode optical fiber", *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA*, Vol. 66, No. 11 (1976).
- [7] Goodman Joseph W., "Introduction to Fourier optics", Second Edition, The McGraw-Hill Companies (1996).
- [8] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, Oxford (1980).
- [9] Orlando Quintero, "Criterios en difracción e interferencia para multiples aberturas", Tesis de Maestría en Física, Universidad de Antioquia, Instituto de Física (1986).
- [10] O. Quintero, J. Barrerra, R. Henao, F. Medina, "Prevailing effects of interference or diffraction by multiple apertures", *Optics Communications* 266 (2006) 558561.

- [11] J. García, R. Castañeda, F. Medina, J. Matteucci, "Distinguishing between Fraunhofer and Fresnel diffraction by the Youngs experiment", *Optics Communications* 200(2001)15-22.
- [12] Voelz David, "Computational Fourier Optics", *Tutorial Texts in Optical Engineering*, Volume TT89, SPIE PRESS (2011).
- [13] M. Giglio, M. Carpineti, A. Vailati, D. Brogioli, "Near-field intensity correlations of scattered light", *APPLIED OPTICS*, Vol. 40, No. 24 y 20 August (2001).
- [14] J. C. Dainty, "Laser Speckle and related Phenomena", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1975).
- [15] Masaaki Imai, "Statistical Properties of Optical Fiber Speckles", *Bolletín of the Faculty of Engineering, Hokkaido University*, No. 130 (1986).
- [16] Chen-Hao P. Lin, Inema Orukari, Christopher Tracy, Lisa Kobayashi Frisk, Manish Verma, Sumana Chetia, Turgut Durduran, Jason W. Trobaugh, and Joseph P. Culver, "Multi-mode fiber-based speckle contrast optical spectroscopy: analysis of speckle statistics", *Opt. Lett.* 48, 1427-1430 (2023)
- [17] E. A. Rueda, F. F. Medina, J. F. Barrera, "Criterio generalizado para la distinción entre difracción de Fraunhofer y Fresnel", *Revista Colombiana de Física*, Vol. 41 No. 1 (2009).