



INAOE

**Enfoque de luz a través de un medio
esparcidor estático**

por

Beatriz Coyotl Ocelotl

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

**MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN LA ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica.**

Agosto de 2014
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Julio César Ramírez San Juan

Dra. Rosario Guadalupe Porras Aguilar.

©INAOE 2014

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias de esta tesis en
su totalidad o en partes mencionando la fuente.



RESUMEN

En el presente trabajo se analizará tanto teórica como experimentalmente el control de la propagación de la luz a través de un medio altamente esparcidor mediante la implementación de un algoritmo secuencial. El objetivo del algoritmo es encontrar la distribución óptima de fase que compense los desfases introducidos por la transmisión de un haz de luz plano coherente a través de un medio esparcidor estático, con el fin de obtener una distribución de intensidad según requiera el usuario. El algoritmo secuencial basa su desempeño en el control de la propagación de la luz a través del medio esparcidor sintetizando una distribución de fase utilizando un modulador espacial de luz (SLM por sus siglas en inglés).

Mediante la implementación experimental del algoritmo secuencial se pretende obtener diferentes distribuciones de intensidad del campo transmitido a través de un trozo de cinta mágica Scotch 3M de ancho aproximado de $100 \mu\text{m}$, variando el tamaño de la región de interés en la región central del CCD utilizado (1 pixel, 9 pixeles, 25 pixeles y 41 pixeles) y la posición (1 pixel fuera de la región central del detector). Para cada región de interés se obtendrá su distribución óptima de fase y se calculará el factor de mejora experimental que se logra para diferentes pruebas variando el número de segmentos utilizados en la optimización.

El control de la propagación de luz a través de un medio además de optimizar la intensidad en una región particular, permite controlar la propagación de la luz para visualizar objetos ocultos detrás de medios esparcidores. El fin último de este trabajo es implementar esta técnica en un futuro para poder visualizar vasos sanguíneos a través de medios esparcidores biológicos como son la piel y los dientes tanto para el caso estático como dinámico.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría en el INAOE durante el periodo 2012-2014.

A mis asesores Dr. Julio César Ramírez y Dra. Rosario Porras por compartir su conocimiento, experiencias y anécdotas, pero sobre todo por la confianza depositada en mí para realizar este proyecto.

A mi familia por todo el apoyo, comprensión y tolerancia que me han brindado siempre. A mis padres por su ejemplo. A mis hermanos por su confianza. A mis sobrinos por ser la luz de mis días. A Rubén, porque aunque no está aquí sigo aprendiendo de él. A Ana María por llegar a mi familia y siempre llenar nuestro hogar de alegría.

A mis amigos de maestría por compartir conmigo momentos muy gratos y otros no tanto.

A Miriam por tu paciencia, por tu apoyo incondicional, por tu oído siempre dispuesto, por alentarme, por ser siempre honesta conmigo, por brindarme tu amistad y sobre todo por esos cafés que poco a poco me fueron despertando.

A Julio Carrillo por las reflexiones en el laboratorio, por compartir sus chistes conmigo, las pilas USB y devolverme la sonrisa.

A Hernando por las charlas terapéuticas a cualquier hora del día, por sus anécdotas y libros, pero sobre todo por su confianza y paciencia.

A Edgar por tu aliento, confianza y amistad incansable.

DEDICATORIA

A mis padres Luis Ángel y Paula.

A mis hermanos Rosalba, Ana María, Luis y Rubén.

A mis sobrinos: Miranda, Daniel, Hernán y Luis Ángel.

Contenido

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Medios transparentes y opacos..... | 4 |
| 1.2. Esparcimiento y métodos de reversión para enfocar luz..... | 5 |
| 1.3. Objetivo..... | 6 |
| 1.4. Justificación..... | 7 |
| 1.5. Contenido de la tesis..... | 7 |
| Referencias..... | 9 |
| Capítulo 2. Análisis teórico..... | 11 |
| 2.1. Conceptos estadísticos..... | 11 |
| 2.1.1. Variables aleatorias y función de densidad de probabilidad..... | 12 |
| 2.1.2. Funciones de correlación y coeficiente de correlación..... | 15 |
| 2.2. Propagación de luz en medios dieléctricos..... | 16 |
| 2.3. Propagación de luz en medios esparcidos..... | 18 |
| 2.4. Conjugación de fase óptica como método de reversión de esparcimiento..... | 24 |
| 2.5. Algoritmos para reenfocar luz a través de un medio esparcido..... | 26 |
| 2.5.1. Algoritmo de optimización paso a paso..... | 29 |
| 2.5.2. Algoritmo de optimización secuencial..... | 29 |
| 2.5.3. Algoritmo de optimización aleatorio..... | 30 |
| 2.5.4. Factor de mejora para el algoritmo secuencial..... | 30 |
| Referencias..... | 34 |
| Capítulo 3. Configuración experimental..... | 36 |
| 3.1. Modulador Espacial de Luz (SLM) y su funcionamiento..... | 37 |
| 3.1.1. Características y parámetros del Modulador Espacial de luz PLUTO..... | 40 |
| 3.1.2. Caracterización del Modulador Espacial de Luz..... | 41 |
| 3.2. Sistema de detección y monitoreo de intensidad..... | 44 |
| 3.3. Programa de control y retroalimentación..... | 45 |
| 3.4. Tiempo de sincronización modulador-detector..... | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Ensamble de las componentes básicas para lograr enfoque de luz a través de un medio esparcidor. | 47 |
| 3.6. Muestra y estabilidad del sistema. | 48 |
| Referencias..... | 50 |
| Capítulo 4. Resultados..... | 51 |
| 4.1. Resultados de la caracterización del Modulador Espacial de Luz..... | 51 |
| 4.2. Medición del coeficiente de correlación como parámetro para determinar la estabilidad del sistema..... | 54 |
| 4.3. Implementación del algoritmo secuencial para enfoque a través de una muestra esparcidora para diferentes patrones..... | 57 |
| 4.3.1. Enfoque de luz a través de un medio esparcidor en 1 píxel en el área central de la CCD..... | 57 |
| 4.3.2. Enfoque de luz a través de una medio esparcidor en región de interés de 9 píxeles (3×3 píxeles)..... | 62 |
| 4.3.3. Enfoque de luz a través de un medio esparcidor en región de interés de 25 píxeles (5×5 píxeles) en el área central de la CCD. | 66 |
| 4.3.4. Optimización de intensidad de luz a través de un medio esparcidor en región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD. | 71 |
| 4.3.5. Enfoque de luz a través de un medio esparcidor en región de interés de 1 píxel fuera de la región central de la CCD. | 74 |
| Referencias..... | 79 |
| Capítulo 5. Conclusiones | 80 |
| Referencias..... | 83 |
| Índice de Figuras | 84 |

Capítulo 1. Introducción.

El objeto de estudio de la óptica es analizar tanto teórica como experimentalmente la generación, propagación e interacción de la luz; así mismo, busca que dicho análisis sea fuente de desarrollo de técnicas y metodologías que puedan ser implementadas ya sea en otras áreas de investigación o en la vida cotidiana. En las últimas décadas diversos grupos de investigación han dedicado sus aportes científicos al estudio de la propagación e interacción de la luz en un medio material, la interacción y propagación de la luz se describe principalmente por los procesos de reflexión, absorción y transmisión de la luz cuando interactúan con un medio [1].

Cuando un haz de luz coherente con longitud de onda λ incide sobre un medio, parte de la luz se refleja sobre la superficie, otra es absorbida por el medio y otra cantidad se transmite a través de este, de acuerdo a sus propiedades físicas y su estructura molecular, alguno o algunos de estos procesos predominarán respecto a los otros. Una forma de clasificar a los medios de acuerdo a como se propaga la luz en su interior es en medios transparentes como el vidrio y en medios opacos como la piel o el papel. Los medios transparentes son aquellos en los que la transmisión de luz predomina sobre los otros procesos y la propagación de la luz se da a través de líneas rectas definidas, en cambio en los medios opacos tanto la reflexión y la absorción predominan sobre la transmisión y la luz se propaga a través de trayectorias completamente aleatorias.

Al atravesar medios opacos la luz choca con moléculas de tamaño menor a la longitud de onda del haz incidente provocando que la molécula absorba la energía de la luz y comience a vibrar hasta emitir radiación con la misma longitud de onda, a este fenómeno se le conoce como esparcimiento. Existen dos tipos de esparcimiento: esparcimiento de Rayleigh y esparcimiento de Mie. La diferencia principal entre estos dos tipos de esparcimiento es el tamaño de las moléculas y la dependencia o independencia de la longitud de onda en el proceso de esparcimiento. Cuando se presenta esparcimiento de Rayleigh las moléculas son menores a $\lambda/15$ y la intensidad de la luz esparcida es proporcional a $1/\lambda^4$, esto permite que ciertas longitudes de onda sean esparcidas en mayor o menor medida. Por el contrario, el esparcimiento de Mie involucra el esparcimiento producido por moléculas de

tamaño comparable a λ , sin embargo; en estos casos la energía ya no es suficiente para hacer vibrar a las moléculas por lo cual el esparcimiento ya no tiene dependencia de la longitud de onda y esto permite que la molécula absorba y reemita todas las longitudes de onda.

La radiación emitida se propagará en direcciones completamente aleatorias, colisionará con otras moléculas y se redireccionará constantemente por lo que la trayectoria del haz incidente al atravesar un medio opaco no puede ser predicha. El frente de onda del haz incidente con una fase y amplitud definidas será completamente distorsionado, la redirección que sufre la luz en el interior del mismo provocará variaciones aleatorias en la fase tanto espacial como temporalmente; así mismo, al depender estrechamente la amplitud de estas variaciones espacio-temporales, esta también será modificada aleatoriamente.

El estudio del esparcimiento es importante debido a sus posibles aplicaciones; en general el esparcimiento lleva información de la fuente y el medio que atraviesa; en base a este factor se han desarrollado técnicas de formación de imagen para recuperar información del medio que atraviesa tales como Laser speckle imaging (SLI) utilizada para medir la velocidad relativa del flujo sanguíneo [2 y 3] y el análisis de la distribución de intensidad de moteado para obtener información de superficies rugosas [4-6].

Recientemente varios grupos de investigación han trabajado en el desarrollo de una nueva técnica de formación de imágenes, la cual tiene como objetivo controlar la propagación de la luz para recuperar de patrones que se pierden al atravesar un medio esparcidor [7-10]. Mediante la optimización de elementos de fase, esta técnica busca compensar los desfases introducidos por un medio esparcidor estático o dinámico, tales como una muestra sintética que simule las propiedades de algún tejido, tejido biológico o cualquier medio sintético que tenga la capacidad de esparcir la luz. Existen dos formas de controlar la propagación de luz a través de medios opacos: optimización por medio de la matriz de transmisión del sistema [8] y mediante algoritmos de optimización secuenciales o aleatorios [9-12].

En el presente trabajo se utiliza un algoritmo de optimización secuencial, el cual es implementado experimentalmente para controlar la propagación de la luz a través de un medio para recuperar dos patrones diferentes a través de un medio esparcidor estático: un punto focal y una línea. Es de sumo interés recuperar patrones o imágenes a través de una muestra esparcidora debido a que esto permitirá recuperar imágenes de objetos que se encuentren ocultos bajo un medio esparcidor arbitrario, esta técnica abre la posibilidad de su implementación en el área médica para visualizar por ejemplo vasos sanguíneos a través de tejido biológico como la piel. Mediante el algoritmo de optimización que se utilizará en este trabajo se pretende encontrar una distribución de retardos de fase que modelen un frente de onda óptimo para compensar los desfases introducidos por el medio esparcidor [12], utilizando como criterio de optimización que cada uno de los retardos en fase logren la máxima intensidad en la región de interés para obtener la distribución de intensidad de un punto focal y una línea.

Una técnica similar a los algoritmos de optimización para lograr enfoque a través de un medio esparcidor es la conjugación de fase óptica, ambas técnicas introducen una fase adecuada para compensar los desfases introducidos por el medio; sin embargo, conceptualmente son diferentes. La conjugación de fase óptica utiliza elementos conjugadores de fase que permiten compensar exactamente los desfases introducidos por un medio distorsionador. Cuando un haz de luz con un frente de onda definido se propaga a través de un medio distorsionador sufrirá variaciones en la fase y amplitud del frente de onda. Al propagarse a través del espacio e incidir sobre la superficie del conjugador de fase, el haz de luz distorsionado será compensado de todos los desfases introducidos por el medio distorsionador. La dirección de propagación de haz se revertirá y el frente de onda será exactamente el mismo en todo el espacio que el frente de onda que se propagaba en la dirección original. Así, si se tiene un haz de luz arbitrario enfocado en una región muy pequeña y se hace propagar a través de un sistema óptico conformado por un medio distorsionador y un conjugador. El haz de luz terminará por enfocarse en una región próxima a la región en que esté situada la fuente de luz originalmente [13]. La conjugación óptica de fase se basa en procesos ópticos no lineales que requieren de elementos conjugadores de fase y láseres de alta potencia que por lo general tienen un alto costo. Por otro lado, los algoritmos de optimización basan su funcionamiento en el aprovechamiento de la interferencia generada por el esparcimiento de la luz y no requieren fuentes de alta potencia.

1.1. Medios transparentes y opacos

Clasificar a un medio como transparente u opaco depende en sí de la naturaleza de la luz y las propiedades ópticas del medio que dan lugar a procesos como reflexión, absorción y esparcimiento, etc. Los materiales que permiten que la mayoría de la luz que incide sobre ellos se transmita a través del medio y que dentro de este la propagación se dé a través de rayos se les conocen como medios transparentes. La luz puede atravesar dicho medio ya que no se presenta algún obstáculo que impida que la luz siga una trayectoria rectilínea definida, ejemplos de medios transparentes pueden ser el agua o el vidrio. La Figura [1] muestra esquemáticamente la transmisión de un haz a través de un sistema de lentes, en este caso el haz sigue una trayectoria determinada por la longitud focal de cada una de las lentes.

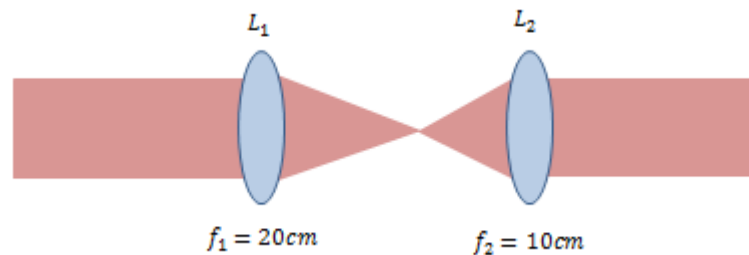


Figura 1. Propagación de luz a través de un material transparente como el vidrio. Sistema de lentes positivas de material transparente, cada lente L_1 y L_2 con una longitud focal característica f_1 y f_2 .

Existen otra clase de medios en los cuales la luz no se propaga a través de estos como lo hace en los medios transparentes. A los medios en los que al incidir un haz de luz arbitrario predomina el esparcimiento y la absorción se les conoce como medios opacos. Cuando un haz de luz incide sobre la superficie de un material opaco, cierta cantidad es reflejada sobre la superficie, otra más es absorbida y el resto es transmitido al otro lado del medio. La luz que se propaga dentro del medio es esparcida dando lugar a un proceso de interferencia aleatoria, el cual se manifiesta como una distribución de intensidad característica denominada speckle o moteado como se ilustra en la Figura [2].

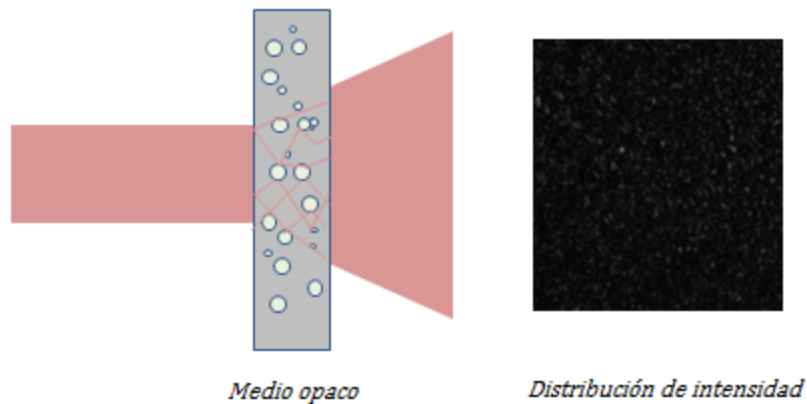


Figura 2. Distribución de intensidad de la luz esparcida al atravesar un medio opaco.

Los medios opacos pueden ser estáticos o dinámicos, si la distribución de intensidad de la luz esparcida presenta estabilidad se trata un medio opaco estático, en cambio, si el patrón presenta fluctuaciones se trata de un medio opaco dinámico.

1.2. Esparcimiento y métodos de reversión para enfocar luz.

El esparcimiento es prueba de la interacción de la luz con la materia a nivel microscópico, esta interacción brinda información de las propiedades ópticas y la dinámica del medio. El esparcimiento es más que un simple redireccionamiento de la luz al encontrar una partícula esparcidora o alguna inhomogeneidad en el medio. Cuando una onda electromagnética interactúa con una partícula esparcidora, ésta se polarizará en la misma dirección que la onda incidente generando un dipolo que oscilará en la misma dirección que el campo incidente. El dipolo radiará energía electromagnética y esta emisión secundaria constituirá la luz esparcida. La polarización de esta radiación tendrá la misma dirección que el dipolo [14]. La distribución de intensidad generada por el esparcimiento puede ser utilizada como herramienta para lograr enfocar luz.

La conjugación de fase óptica permite revertir tanto la dirección de propagación como el factor de fase para una onda plana que proviene de un haz de

luz arbitrario. Cuando el haz incide sobre un elemento conjugador de fase, las propiedades del haz conjugado no son dañadas por la interposición de un medio no homogéneo. Esto, siempre y cuando la luz distorsionada incida sobre el conjugador de fase obteniendo así únicamente un retraso en fase. Los algoritmos de optimización también permiten enfocar luz a través de un medio opaco, el lograr enfoque con esta técnica depende del desempeño del algoritmo para modelar un frente de onda que permita que todos los elementos del modulador se encuentren en fase en la región de interés.

Los algoritmos de optimización son una técnica alternativa a los métodos adaptivos convencionales [15] que pretenden compensar aberraciones de un sistema óptico arbitrario para obtener un frente de onda óptimo. A diferencia de los métodos adaptivos, la técnica descrita en esta tesis no requiere un haz de alta calidad puesto que es capaz de compensar las aberraciones del sistema óptico y al mismo tiempo aprovechar los procesos de difracción e interferencia que no son aprovechados en los métodos adaptivos puesto que las técnicas adaptivas basan su desempeño en óptica de rayos.

1.3. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es controlar la propagación de la luz a través de un medio opaco estático para lograr enfoque a través de este, mediante la implementación experimental de un algoritmo de optimización secuencial. En la implementación experimental se utiliza como herramienta un modulador espacial de luz, con el cual se sintetizará un frente de onda óptimo que permita obtener la máxima intensidad en una región de interés, el monitoreo de dicha intensidad se hará acoplado un sistema de detección y un programa de control con el SLM.

Se deben considerar tres objetivos particulares para lograr enfoque a través de un medio opaco. El primero consiste en el análisis teórico del funcionamiento del algoritmo secuencial para enfocar la luz a través del medio. Debido a la importancia que tiene el desempeño del modulador espacial de luz en la implementación experimental del algoritmo secuencial el segundo objetivo es caracterizar el SLM para asegurar la correcta modulación en modo mayoritario de fase del dispositivo.

El tercer objetivo es el acoplamiento del software y el hardware requerido para implementar el algoritmo secuencial al arreglo experimental. El funcionamiento del algoritmo secuencial se analizará teóricamente mediante el estudio de la transmisión de un haz de luz cuando atraviesa un medio opaco estático [11]. La caracterización del modulador espacial de luz se hará con un método cualitativo utilizado en [16].

1.4. Justificación.

La óptica biomédica es un área de investigación que ha crecido rápidamente en los últimos años, centrandose su objetivo en la investigación, desarrollo e implementación de técnicas y metodologías que utilicen procesos ópticos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, principalmente en el área de formación de imágenes. Existen varias razones favorables para implementar técnicas biofotónicas, como que los fotones proveen radiación segura para aplicaciones médicas, procesos ópticos como la absorción, fluorescencia y esparcimiento proveen información respecto a la conformación molecular de cualquier material biológico, utilizar las propiedades ópticas de algunas sustancias para utilizarlas como biomarcadores, entre otras [17]. Las técnicas biofotónicas implementadas al área médica tienen la ventaja de ser no invasivas en comparación a las técnicas médicas convencionales.

El mayor interés que se tienen en esta técnica, es su prometedora implementación en el área médica. Esta técnica de modelar un frente de onda para tener control de la propagación de la luz a través de medios opacos permite recuperar patrones como un punto focal [12] o visualizar objetos que se encuentran detrás de un medio opaco [10]. Al hacer incidir luz sobre tejido biológico, se genera esparcimiento y como se mencionó previamente, este puede ser utilizado para obtener información del medio o para visualizar objetos ocultos como un vaso sanguíneo detrás de piel o a través de un diente.

1.5. Contenido de la tesis

La tesis está estructurada en cinco capítulos, el primero de ellos corresponde a la introducción. En el Capítulo 2 se encuentran los conceptos teóricos y herramientas

matemáticas necesarias para hacer un análisis de la propagación de la luz tanto en medios transparentes como en medios opacos, en este capítulo también se analizará la teoría de la conjugación de fase óptica. Así mismo, en este capítulo se abordan los conceptos teóricos de cantidades estadísticas necesarias para el análisis cuantitativo de un medio esparcidor dado que estos tienen influencia notable en la implementación experimental. Al final de este capítulo se abordarán los diferentes tipos de algoritmos que pueden ser implementados para controlar la propagación de la luz para lograr enfoque a través de un medio opaco y el análisis teórico del algoritmo secuencial utilizado en este trabajo.

En el Capítulo 3 se describe la configuración experimental utilizada en las pruebas reportadas en este trabajo, describiendo el funcionamiento de sus componentes, poniendo particular interés en el funcionamiento del SLM.

Los resultados obtenidos con la implementación experimental se muestran en el Capítulo 4, así como las pruebas realizadas para determinar la estabilidad del sistema y los resultados de la implementación del algoritmo al arreglo experimental. Se presentan y analizan los factores de mejora obtenidos y los niveles de intensidad alcanzados para las diferentes pruebas realizadas con el algoritmo secuencial. Adicionalmente, se presentan los resultados de la caracterización del SLM para asegurar su correcta modulación de fase en el rango requerido. Finalmente en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro.

Referencias

- [1] Hetch, Eugene. *Óptica*. Tercera edición. Madrid: Addison Wesley. (2000). Cap. 4.
- [2] B. Choi; J. C. Ramirez-San-Juan; J. Lotfi; J. S. Nelson. *Linear response range characterization and in vivo application of laser speckle imaging of blood flow dynamics*. J. Biomed. Opt. 11(4), 041129 (2006).
- [3] K. R. Forrester; J. Tulip; C. Leonard; C. Stewart, and R. C. Bray. *A laser speckle imaging technique for measuring tissue perfusion*. IEEE Transactions on biomedical engineering. Vol. 51. No.11. (2004).
- [4] H. El-Ghandour; M. Saady and A. Ashour. *Analysis of surface roughness using laser optical imaging techniques*. Journal of Materials Science and Engineering. Vol. 2. No.1 (2012)
- [5] M. Nicklawy; A. F. Hassan; M. Bahrawi; N. Farid and A. M. Sanjid. *Characterizing surface roughness by speckle pattern analysis*. Journal of Scientific & Industrial Research. Vol. 68. (2009).
- [6] Ortiz Alvarado, Juan de Dios. *Desarrollo y aplicación de instrumentación para la medición de esparcimiento de luz láser*. Tesis Dr. Instituto Politécnico Nacional. 102 p.
- [7] I. M. Vellekoop and A. P. Mosk. *Focusing light through opaque strongly scattering media*. Optics Letters. Vol. 32, No. 16. 2309 (2007).
- [8] S. M. Popoff; G. Lerosey; R. Carminati; M. Fink; A.C. Boccara and S. Gigan. *Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media*. Phys. Rev. Lett. 104, 100601. (2010).
- [9] C. Stockbridge; Y. Lu; J. Moore; S. Hoffman; R. Paxman; K. Toussaint and T. Bifano. *Focusing through dynamic scattering media*. Optics Express. Vol. 20, Issue 14. (2012).
- [10] O. Katz; E. Small and Y. Silberberg. *Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light*. Nature Photonics. Nature Photonics. Vol. 6. 549–553 (2012).
- [11] I.M. Vellekoop and A.P. Mosk. *Phase control algorithms for focusing light through turbid media*. Optics Communications. 281. 3071–3080. (2008).
- [12] I. M. Vellekoop¹; A. Lagendijk and A. P. Mosk. *Exploiting disorder for perfect focusing*. Nature Photonics 4, 320 - 322 (2010).
- [13] Fisher, Robert A. *Optical phase conjugation*. New York: Academic Press. (1983). Cap. 1.

- [14] Kerker, Milton. *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. New York: Academic Press. (1969). Cap. 3.
- [15] R. K. Tyson. *Principles of adaptive optics*. 2nd ed. New York: Academic Press. (1998). Cap. 1.
- [16] Vázquez Olivós, María de los Ángeles Josefina. *Caracterización de una pantalla de cristal líquido nemático como modulador de fase*. Tesis Mag. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica Y Electrónica. 165 p.
- [17] Wang, Lihong V. and Wu, Hisin-I. *Biomedical Optics, principles and imaging*. United States: John Wiley & Sons. (2007). Cap.1.

Capítulo 2. Análisis teórico

El control de la propagación de la luz a través de un medio esparcidor debe ser explicado mediante un modelo matemático que permita comprender este proceso cualitativa y cuantitativamente; mediante la implementación experimental del modelo teórico se puede saber si la teoría se acopla a la realidad. El modelo matemático del control de propagación de luz a través de un medio esparcidor se basa en el análisis de la matriz de transmisión de un haz arbitrario a través de un medio que introduzca desfases al frente de onda incidente al propagarse a través del medio, mediante el control de bloques de fase se modela un frente de onda cuyos elementos de fase se encuentren en fase para optimizar la intensidad en una región de interés arbitraria [1,2].

En este capítulo se analizarán las herramientas matemáticas y modelos teóricos que permiten entender el enfoque de luz a través de un medio opaco estático. En la sección 2.1 se revisarán algunos conceptos estadísticos, en la sección 2.2 y 2.3 se analizará la propagación de luz a través de un medio transparente y la propagación de luz a través de un medio esparcidor estático, respectivamente. En la sección 2.4 se explica el funcionamiento de la conjugación de fase óptica y se presenta la demostración teórica de cómo esta técnica permitiría enfoque de luz a través de un medio esparcidor. Finalmente en la sección 2.5 se analiza la teoría del algoritmo secuencial y el factor de mejora que cuantifica el desempeño del algoritmo.

2.1. Conceptos estadísticos.

El análisis estadístico es requerido cuando existe carencia de información para dar una solución exacta a un fenómeno físico. La interacción de la luz con medios esparcidores es un fenómeno estadístico porque no puede ser predicho de forma exacta, ya que dependerá del estado en que se encuentre el material y este puede cambiar de acuerdo a las condiciones externas o internas que lo afecten. Por ello es necesario estudiar cada posible estado junto con su probabilidad de ocurrencia asociada [3].

En las siguientes subsecciones se abordan los conceptos estadísticos necesarios para analizar la interacción de la luz con la materia, particularmente la interacción de la luz con una muestra esparcidora. Se definirá una variable aleatoria y su función de probabilidad y función densidad de probabilidad asociada, además de definir funciones de correlación y coeficiente de correlación y el valor esperado de una cantidad física.

2.1.1. Variables aleatorias y función de densidad de probabilidad.

En un experimento aleatorio se puede obtener diferentes resultados, por ello es necesario definir un conjunto que contenga a todos los posibles resultados, así bien definamos a este conjunto como $\{A\}$ y a los posibles eventos como $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$; el conjunto admite combinación lineal entre ellos. Es preciso definir para cada uno de estos eventos la probabilidad de ocurrencia, por ello se definen los siguientes axiomas de probabilidad para un evento arbitrario A :

1. Para cualquier probabilidad $P(A)$, $P(A) \geq 0$.
2. Si es seguro que ocurra un evento A entonces $P(A) = 1$.
3. Si A_1 y A_2 son eventos mutuamente excluyentes, es decir, la ocurrencia de uno garantiza la no ocurrencia del otro, entonces la probabilidad de ocurrencia de A_1 o A_2 será $P(A_1 \text{ o } A_2) = P(A_1) + P(A_2)$.

Para cada posible evento A del experimento se asigna un número real $u(A)$, así una variable aleatoria U se define como un conjunto de todos sus posibles valores $u(A)$ junto con una medida de su probabilidad asociada. Existen dos tipos de variables aleatorias, las variables aleatorias discretas y las variables aleatorias continuas, dependiendo del conjunto de valores posibles que pueda tomar. De esta manera, si una variable puede tomar un número discreto de valores entonces se denomina variable aleatoria discreta. En cambio sí puede tomar un conjunto continuo de posibles valores se denomina variable aleatoria continua.

Para describir una variable aleatoria es preciso definir la función de distribución de probabilidad, la cual se define como la probabilidad de que la variable aleatoria U asuma un valor menor o igual a u :

$$F_U(u) = \{Prob U \leq u\}. \quad (2.1.1.1)$$

Si U cae éntre los límites a y b entonces:

$$Prob \{a < U \leq b\} = F_U(b) - F_U(a). \quad (2.1.1.2)$$

La función de distribución de probabilidad debe ser creciente a la derecha, igual a cero cuando $u = -\infty$ e igual a 1 cuando $u = \infty$. Una vez definida la función de distribución de probabilidad, la función de densidad de probabilidad ahora se define como:

$$\rho_U(u) = \frac{d}{du} F_U(u). \quad (2.1.1.3)$$

Si U es una variable aleatoria continua y $F_U(u)$ es diferenciable en todos lados entonces:

$$\rho_U(u) = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{F(u) - F(u - \Delta u)}{\Delta u}. \quad (2.1.1.4)$$

Y con Δu lo suficientemente pequeño

$$\rho_U(u)\Delta u = Prob\{(u - \Delta u) < U \leq u\}. \quad (2.1.1.5)$$

Por las propiedades básicas de $F_U(u)$ entonces la función de densidad de probabilidad debe cumplir las siguientes condiciones en el caso de una variable aleatoria continua:

$$\rho_U(u) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \rho_U(u) du = 1. \quad (2.1.1.6)$$

Para el caso de una variable aleatoria discreta

$$\rho_U(u) = \sum_{k=1}^{\infty} P(u_k) \delta(u - u_k). \quad (2.1.1.7)$$

Donde la función δ cumple $\delta(u - u_k) = 0$ si $u \neq u_k$.

Si ahora se consideran dos experimentos aleatorios con sus posibles conjuntos de eventos y definimos un nuevo conjunto que contenga los pares con una componente de cada conjunto $\{A \times B\}$, se debe entonces asignar una probabilidad conjunta $P(A, B)$ a cada uno de esos pares. Para cada salida de ambos conjuntos se debe asignar un valor numérico $u(A)$ y $v(B)$ según el conjunto de salidas al que pertenezcan; así bien debe entonces definirse una variable aleatoria conjunta UV como la colección de todos los posibles valores numéricos conjuntos (u, v) junto con su medida asociada de probabilidad.

Al igual que para las variables aleatorias se debe definir también su función de distribución de probabilidad para las variables aleatorias conjuntas UV como:

$$F_{UV}(u, v) = Prob \{U \leq u \text{ y } V \leq v\}. \quad (2.1.1.8)$$

Y su función de densidad de probabilidad conjunta se define como:

$$\rho_{UV}(u, v) = \frac{\partial^2}{\partial u \partial v} F_{UV}(u, v). \quad (2.1.1.9)$$

Una función de densidad de probabilidad conjunta ocupada en este trabajo es la función de densidad de probabilidad Gaussiana para una variable compleja como es el campo se escribe de la siguiente forma:

$$\rho_{UV}(u, v) = \frac{1}{\pi \langle I \rangle} \exp \left(-\frac{|u|^2 + |v|^2}{\langle I \rangle} \right). \quad (2.1.1.10)$$

La función de densidad de probabilidad debe cumplir $\iint_{-\infty}^{\infty} \rho_{UV}(u, v) du dv = 1$.

2.1.2. Funciones de correlación y coeficiente de correlación.

Para las variables aleatorias conjuntas U y V con función de densidad de probabilidad $\rho_{UV}(u, v)$ se definen los momentos conjuntos de la siguiente forma:

$$\overline{u^n v^m} = \iint_{-\infty}^{\infty} u^n v^m \rho_{UV}(u, v) du dv. \quad (2.1.2.1)$$

Uno de estos momentos conjuntos es la correlación de las variables aleatorias U y V y se define como:

$$\Gamma_{UV} = \overline{uv} = \iint_{-\infty}^{\infty} u v \rho_{UV}(u, v) du dv. \quad (2.1.2.2)$$

La correlación se puede interpretar como una medida de la linealidad de dos variables aleatorias o el grado de proporcionalidad entre ellas.

La covarianza de U y V se define como:

$$C_{UV} = \overline{(u - \bar{u})(v - \bar{v})} = \Gamma_{UV} - \bar{u} \bar{v}. \quad (2.1.2.3)$$

Y finalmente el coeficiente de correlación se puede calcular como:

$$\rho = \frac{C_{UV}}{\sigma_U \sigma_V}, \quad (2.1.2.4)$$

donde σ_U y σ_V son la desviación estándar de las variables aleatoria U y V, respectivamente.

El coeficiente de correlación es una medida directa de la similitud de las fluctuaciones de las variables aleatorias U y V, también da un parámetro lineal de la dependencia o independendencia entre ambas variables [4]. Este parámetro puede tomar valores entre -1 y 1 y su norma puede tomar valores entre 0 y 1. Sí $\rho=0$, no existe correlación entre las variables aleatorias en cuestión o las variables

aleatorias son independientes, en cambio sí $\rho=1$ se dice que las variables aleatorias en cuestión están altamente correlacionadas o que el grado de similitud entre ellas es alto; es decir, existe dependencia lineal. Para el caso de un coeficiente de correlación con un valor de -1 se dice que las variables aleatorias están correlacionadas fuertemente pero con tendencia lineal negativa; es decir, si aumenta el valor de una variable aleatoria disminuye el valor de la otra. Para valores intermedios ya sean positivos o negativos del coeficiente de correlación, se dice que las variables aleatorias están correlacionadas en mayor o menor medida según sea el caso y de manera positiva o negativa según indique el valor del coeficiente.

2.2. Propagación de luz en medios dieléctricos.

La ecuación que describe la propagación de ondas electromagnéticas, ya sea en el vacío o a través de un medio dieléctrico como el vidrio es la ecuación de onda. Para un medio dieléctrico, homogéneo, no magnético, no conductor y en el que no hay cargas libres según [5 y 14], se deduce la ecuación de onda de las ecuaciones de Maxwell, las cuales en el Sistema Internacional de unidades se escriben como:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\end{aligned}\tag{2.2.1}$$

donde,

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}\tag{2.2.2}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}\tag{2.2.3}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL}\tag{2.2.4}$$

donde \mathbf{D} es el vector de desplazamiento, \mathbf{E} es el campo eléctrico, \mathbf{J} es la densidad de corriente eléctrica, ρ es la densidad de carga dentro del medio, \mathbf{B} es la densidad de flujo magnético, \mathbf{H} es el vector de intensidad de campo magnético, \mathbf{P} la polarización

y finalmente ε y μ son parámetros que caracterizan el material representando la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del material respectivamente.

Para deducir la ecuación de onda para materiales dieléctricos es preciso realizar las siguientes operaciones, aplicar el operador rotacional a la última de las cuatro ecuaciones expresadas en (2.2.1):

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial(\nabla \times \mathbf{B})}{\partial t}, \quad (2.2.5)$$

tomando la identidad $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - (\nabla \cdot \nabla)\mathbf{A}$ y la definición de densidad de flujo magnético expresado en (2.2.3), la ecuación (2.2.5) queda expresada como:

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - (\nabla \cdot \nabla)\mathbf{E} = -\mu \frac{\partial(\nabla \times \mathbf{H})}{\partial t}. \quad (2.2.6)$$

Tomando en cuenta que dentro del medio no hay cargas que produzcan un campo eléctrico entonces $\nabla \cdot \mathbf{E} = \mathbf{0}$ y además sustituyendo la tercera ecuación de (2.2.1) se tiene que:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right)}{\partial t}. \quad (2.2.7)$$

Como $\mathbf{J} = 0$, la ecuación (2.2.7) queda expresada de la siguiente manera:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}. \quad (2.2.8)$$

Finalmente acomodando ambos términos y sustituyendo (2.2.2) en (2.2.8) se obtiene:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2} \quad (2.2.9)$$

La expresión anterior es la ecuación de onda que describe la propagación de las ondas electromagnéticas a través de medios dieléctricos, transparentes, no magnéticos, no conductores y en los cuales no hay cargas libres. En el caso de

ausencia de polarización no lineal, el lado derecho de la ecuación es igual a cero y la ecuación se (2.2.9) se reduce a la forma estándar de la ecuación lineal de onda:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.2.10)$$

Esta ecuación permite soluciones con variable separables del tipo:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}. \quad (2.2.11)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.1.11) en la ecuación (2.2.10) y eliminando los términos exponenciales de la ecuación se tiene:

$$\nabla^2 \mathbf{U} + \omega^2 \mu_0 \epsilon \mathbf{U} = 0. \quad (2.2.12)$$

Esta es la ecuación de onda independiente del tiempo también conocida como ecuación de Helmholtz [6].

2.3. Propagación de luz en medios esparcidos.

Los medios opacos son medios en los cuales la propagación de luz ocurre en el régimen difuso [7]. De manera superficial se puede decir que la interacción de la luz con la materia en medios esparcidos se manifiesta mediante una redirección de los fotones a través de trayectorias completamente aleatorias determinadas por la estructura interna del medio y la naturaleza de la luz [8].

Existen dos clases de interacciones radiación-materia distinguidas por la energía del fotón esparcido: esparcimiento elástico y esparcimiento inelástico. La primera clase de esparcimiento se da cuando el fotón incide sobre una partícula o molécula esparcidora y la energía del fotón esparcido es la misma que la del fotón incidente, la segunda clase de esparcimiento se da cuando la energía del fotón esparcido es mayor o menor que la del fotón incidente como resultado de efectos no lineales. El esparcimiento puede ser afectado por la movilidad de las partículas esparcidoras, por ejemplo cuando se tiene tejido biológico como la sangre, éste propicia esparcimiento dinámico debido a que las células sanguíneas de dicho fluido están en constante movimiento.

La ecuación de difusión, modela la propagación de la energía electromagnética a través del medio esparcidor, cuya derivación se da a través de la ecuación de transporte radiativo como se deduce en [7]. La ecuación de difusión para fuentes en estado estacionario es:

$$[-D\nabla^2 + \mu_a]\Phi(\mathbf{r}) = S(\mathbf{r}). \quad (2.3.1)$$

donde $\Phi(\mathbf{r})$ es la intensidad o irradiancia y $S(\mathbf{r})$ representa una fuente isotrópica. Las soluciones a esta ecuación describirán la distribución de intensidad del campo al atravesar un medio esparcidor.

De acuerdo a la geometría que presenta el problema, es de utilidad cambiar la ecuación de difusión para fuentes en estado estacionario a coordenadas de Fourier [9,10]. Es decir, se pretende resolver la ecuación de difusión para conocer la distribución de intensidad generada por una fuente esparcidora colocada en z_0 proveniente del interior de un bloque de material esparcidor que es infinitamente largo en las direcciones x y y , con un ancho finito L en la dirección z . La ecuación (2.3.1) en este caso se escribe como:

$$[-D(\partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2) + \mu_a]\Phi(\mathbf{r}) = S(x, y)\delta(z - z_0). \quad (2.3.2)$$

Para cambiar a las coordenadas óptimas para la resolución de la ecuación de difusión, se aplica transformada de Fourier a ambas partes de la ecuación (2.3.2).

$$\begin{aligned} \int \int [-D(\partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2) + \mu_a]\Phi(x, y, z)e^{-iq_x x} e^{-iq_y y} dx dy \\ = \int \int S(x, y)\delta(z - z_0)e^{-iq_x x} e^{-iq_y y} dx dy. \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Utilizando la propiedad de la transformada de Fourier para una derivada $\mathcal{F}\left[\frac{\partial^n f(t)}{\partial t^n}\right] = (i\omega)^n F(\omega)$ y que $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$, la parte izquierda de la ecuación (2.3.3) se expresa de la siguiente forma:

$$\int \int \{-D(\partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2) + \mu_a\}\Phi(x, y, z)e^{-iq_x x} e^{-iq_y y} dx dy \quad (2.3.4)$$

$$\begin{aligned}
&= \{-D [(iq_x)^2 + (iq_y)^2 + \partial_z^2] + \mu_a\} \Phi(q_x, q_y, z) \\
&= \{D[q_x^2 + q_y^2 - \partial_z^2] + \mu_a\} \Phi(q_x, q_y, z) \\
&= \{D[\mathbf{q}_\perp^2 - \partial_z^2] + \mu_a\} \Phi(\mathbf{q}_\perp, z).
\end{aligned}$$

Mientras que la expresión del lado derecho de la ecuación (2.3.3) es:

$$\begin{aligned}
\iint S(x, y) \delta(z - z_0) e^{-iq_x x} e^{-iq_y y} dx dy &= S(q_x, q_y) \delta(z - z_0) \\
&= S(\mathbf{q}_\perp) \delta(z - z_0).
\end{aligned} \tag{2.3.5}$$

Igualando y combinando los términos de las expresiones (2.3.4) y (2.3.5) se tiene:

$$\{D[\mathbf{q}_\perp^2 - \partial_z^2] + \mu_a\} \Phi(\mathbf{q}_\perp, z) = S(\mathbf{q}_\perp) \delta(z - z_0), \tag{2.3.6}$$

$$\left\{ \mathbf{q}_\perp^2 - \partial_z^2 + \frac{\mu_a}{D} \right\} \Phi(\mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D} \delta(z - z_0), \tag{2.3.7}$$

$$\left\{ \mathbf{q}_\perp^2 - \partial_z^2 + \frac{\mu_a}{D} \right\} \Phi(\mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D} \delta(z - z_0). \tag{2.3.8}$$

Finalmente sustituyendo $\alpha = \sqrt{\mathbf{q}_\perp^2 + \frac{\mu_a}{D}}$, la ecuación de difusión para fuentes en estado estacionario se expresa como:

$$\{\alpha^2 - \partial_z^2\} \Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D} \delta(z - z_0). \tag{2.3.9}$$

La ecuación (2.3.9), es una ecuación diferencial lineal no homogénea de segundo orden que admite soluciones del tipo $\Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \Phi_h(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) + \Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z)$, donde $\Phi_h(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z)$ es la solución a la ecuación homogénea y $\Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z)$ es la solución particular de la ecuación [11]. Primero se resolverá la ecuación para el caso en que la ecuación de la expresión (2.3.9) sea homogénea. Es decir, cuando el término de la parte derecha de la ecuación es igual a cero. Para

obtener el polinomio característico de la ecuación se propone una solución del tipo $\Phi_h(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = e^{-irz}$, de esta forma se tiene:

$$\{\alpha^2 - \partial_z^2\}\Phi_h(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \{\alpha^2 - \partial_z^2\}e^{-irz} = \{\alpha^2 - (ir)^2\}e^{-irz} = 0. \quad (2.3.10)$$

De esta forma el polinomio característico de la ecuación (34) será:

$$\alpha^2 + r^2 = 0,$$

con soluciones $r = \pm i\alpha$.

La solución homogénea completa es:

$$\Phi_h(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = A(\alpha)e^{\alpha z} + B(\alpha)e^{-\alpha z}. \quad (2.3.11)$$

La solución particular se puede obtener calculando la transformada de Fourier de la ecuación (2.3.9) respecto de z .

$$\int \{\alpha^2 - \partial_z^2\}\Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z)e^{-iq_z z} dz = \int \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D} \delta(z - z_0)e^{-iq_z z} dz, \quad (2.3.12)$$

$$\{\alpha^2 - (iq_z)^2\}\Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, q_z) = \{\alpha^2 + q_z^2\}\Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, q_z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D} e^{-iq_z z_0}. \quad (2.3.13)$$

Ahora se tiene la solución en coordenadas de Fourier; sin embargo, la solución que se busca debe ser dependiente de z , con ese fin se aplica nuevamente la operación inversa de Fourier para $\Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, q_z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D\{\alpha^2 + q_z^2\}} e^{-iq_z z_0}$.

$$\begin{aligned} \Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) &= \frac{1}{2\pi} \int \Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, q_z) e^{iq_z z} dq_z \\ &= \frac{1}{2\pi} \int \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D\{\alpha^2 + q_z^2\}} e^{-iq_z z_0} e^{iq_z z} dq_z \\ &= \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2\pi D} \int \frac{1}{\alpha^2 + q_z^2} e^{-iq_z z_0} e^{iq_z z} dq_z. \end{aligned} \quad (2.3.14)$$

La expresión (2.3.14) contiene una integral de variable compleja con función analítica $f(z)$. Para resolver esta ecuación se puede utilizar el teorema de los residuos, el que establece que si $f(z)$ es una función analítica en la frontera de \mathbb{C} en

una región Ω excepto en un número finito de polos o singularidades dentro de Ω , entonces la integral se puede expresar como la suma de todos los residuos de $f(z)$ [12].

$$\oint_C f(z)dz = 2\pi i \sum_{k=1}^m \text{Res}(f, z_k).$$

En este caso la función analítica $f(q_z)$ está dada por:

$$f(q_z) = \frac{1}{\alpha^2 + q_z^2} e^{-iq_z z_0} e^{iq_z z}. \quad (2.3.15)$$

Cuyos polos son $\pm i\alpha$. Los residuos correspondientes para $i\alpha$ y $-i\alpha$ son:

$$\begin{aligned} \text{Res}(i\alpha) &= \lim_{q_z \rightarrow i\alpha} \left\{ (q_z - i\alpha) \frac{1}{\alpha^2 + q_z^2} e^{iq_z(z-z_0)} \right\} \\ &= \lim_{q_z \rightarrow i\alpha} \left\{ (q_z - i\alpha) \frac{1}{(q_z + i\alpha)(q_z - i\alpha)} e^{iq_z(z-z_0)} \right\} \\ &= \lim_{q_z \rightarrow i\alpha} \left\{ \frac{1}{(q_z + i\alpha)} e^{iq_z(z-z_0)} \right\} = \frac{e^{-\alpha(z-z_0)}}{2i\alpha}. \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

$$\text{Res}(-i\alpha) = \frac{e^{\alpha(z-z_0)}}{-2i\alpha}. \quad (2.3.17)$$

Regresando a la ecuación (2.3.14), la solución particular para $i\alpha$ es:

$$\begin{aligned} \Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) &= \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2\pi D} \int \frac{1}{\alpha^2 + q_z^2} e^{-iq_z z_0} e^{iq_z z} dq_z = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2\pi D} \left[2\pi i \frac{e^{-\alpha(z-z_0)}}{2i\alpha} \right] \\ &= \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2D\alpha} e^{-\alpha(z-z_0)}. \end{aligned} \quad (2.3.18)$$

Y la solución particular para $-i\alpha$ es:

$$\Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2\pi D} \left[-2\pi i \frac{e^{\alpha(z-z_0)}}{-2i\alpha} \right] = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2D\alpha} e^{\alpha(z-z_0)}. \quad (2.3.19)$$

La solución particular para todo z será:

$$\Phi_p(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2D\alpha} e^{-\alpha|z-z_0|}. \quad (2.3.20)$$

La solución total será la suma de la ecuación homogénea más la solución a la ecuación particular, así la solución total será:

$$\Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2D\alpha} [A(\alpha)e^{\alpha z} + B(\alpha)e^{\alpha(L-z)} + e^{-\alpha|z-z_0|}]. \quad (2.3.21)$$

Los factores $A(\alpha)$ y $B(\alpha)$ pueden ser determinadas mediante las condiciones iniciales, suponiendo que la fuente provenga del interior del medio y que en las interfaces de la muestra la intensidad sea:

$$\begin{aligned} \Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, 0) &= 0, \\ \Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, L) &= 0. \end{aligned} \quad (2.3.22)$$

Los factores $A(\alpha)$ y $B(\alpha)$ determinados mediante las condiciones iniciales son:

$$\begin{aligned} A(\alpha) &= \frac{e^{\alpha z_0} - e^{-\alpha z_0}}{1 - e^{2\alpha L}} \\ B(\alpha) &= \frac{e^{\alpha(L-z_0)} - e^{-\alpha(L-z_0)}}{1 - e^{2\alpha L}}. \end{aligned} \quad (2.3.23)$$

Así reescribiendo la solución total de la ecuación (2.3.21), la intensidad será:

$$\begin{aligned} \Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) &= \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{2D\alpha} \left[\left(\frac{e^{\alpha z_0} - e^{-\alpha z_0}}{1 - e^{2\alpha L}} \right) e^{\alpha z} + \left(\frac{e^{\alpha(L-z_0)} - e^{-\alpha(L-z_0)}}{1 - e^{2\alpha L}} \right) e^{\alpha(L-z)} \right. \\ &\quad \left. + e^{-\alpha|z-z_0|} \right], \end{aligned} \quad (2.3.24)$$

$$\Phi(\alpha, \mathbf{q}_\perp, z) = \frac{S(\mathbf{q}_\perp)}{D\alpha} \left[\frac{\sinh(\alpha z_0) e^{\alpha z} + \sinh(\alpha[L-z_0]) e^{\alpha(L-z)}}{1 - e^{2\alpha L}} + \frac{e^{-\alpha|z-z_0|}}{2} \right]. \quad (2.3.25)$$

Esta solución describe la distribución de la luz en cualquier posición dentro del medio esparcidor. Una solución parecida se encuentra en [13] y soluciones para el caso más general de la ecuación de difusión en el que se considera fuentes dependientes del tiempo se encuentran en [9 y10].

2.4. Conjugación de fase óptica como método de reversión de esparcimiento.

La conjugación de fase óptica es un fenómeno que puede ser implementado como técnica que permita enfocar la luz a través de medios esparcidores. La conjugación de fase óptica incorpora efectos ópticos no lineales que tienen la propiedad de revertir exactamente la dirección de propagación de un haz de luz arbitrario mediante elementos conjugadores de fase. Los conjugadores de fase son elementos ópticos que permiten revertir tanto la dirección de propagación del haz como compensar exactamente los desfases introducidos por un medio distorsionador [5].

La conjugación de fase óptica es útil cuando se desea conservar las propiedades y calidad de un haz. Como resultado de esta propiedad es posible lograr enfoque de luz coherente al propagar una fuente puntual en el espacio, colimarla, hacerla pasar por un medio que distorsione el frente de onda plano, incidir sobre un conjugador de fase y mediante este revertir la dirección de propagación y compensar los desfases introducidos por el medio distorsionador como se muestra en la figura [3].

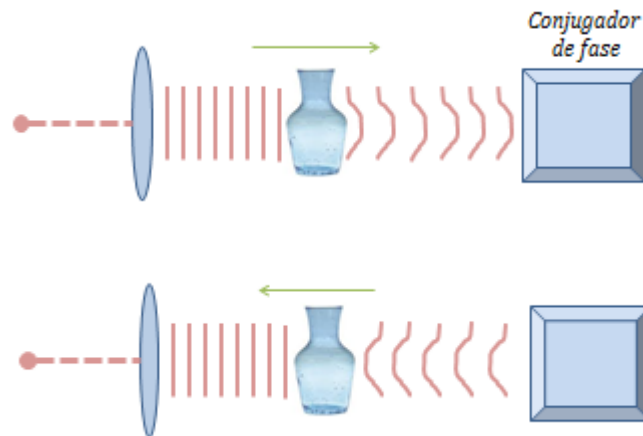


Figura 3. Enfoque de luz a un objetivo pequeño mediante aplicación de conjugación de fase óptica.

A continuación se demuestra matemáticamente cómo es posible lograr enfoque eliminando las distorsiones introducidas por un medio esparcidor utilizando conjugación de fase óptica como se hace en [5].

Considerando una onda monocromática propagándose a través de un medio compuesto; es decir, un medio en el cual se pueden encontrar elementos ópticos como lentes, espejos, amplificadores de señales etc., dicho medio tendrá una permitividad eléctrica representada por $\epsilon(\mathbf{r})$, esta representará el paso del haz a través de componentes ópticas particulares y por medios distorsionadores tal como la atmosfera. El haz se propaga en la dirección (+z) y está representado por:

$$E_1(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \xi_1(\mathbf{r}) \exp[-i(\omega t - kz)] + c. c. \quad (2.4.1)$$

Sustituyendo la ecuación (2.4.1) en la ecuación de onda para medios no lineales expresada en (2.2.9) y tomando en cuenta que la polarización se puede expresar como:

$$\mathbf{P}_{NL} = \frac{1}{2} \mathcal{P}(z, t) \exp[-i(\omega t - kz)] + c. c. + \text{otros términos}, \quad (2.4.2)$$

se deduce la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} -\xi_1 k^2 + 2ik \frac{\partial \xi_1}{\partial z} + \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial z^2} + \mu_0 \epsilon \left[\xi_1 \omega^2 + 2i\omega \frac{\partial \xi_1}{\partial t} + \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} \right] \\ = \mu_0 \left[\mathcal{P} \omega^2 + 2i\omega \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \mathcal{P}}{\partial t^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

En el límite de variaciones temporales lentas $\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial z^2} \ll \frac{\partial \xi_1}{\partial z}$, y además $\frac{\partial \xi_1}{\partial z}$ está multiplicado por el número de onda k el cual es muy grande y lo mismo aplica para los términos temporales, considerando esto la ecuación (2.4.3) queda escrita como:

$$\nabla^2 \xi_1 + [\omega^2 \mu_0 \epsilon(\mathbf{r}) - k^2] \xi_1 + 2ik \frac{\partial \xi_1}{\partial z} - \mu_0 \mathcal{P} \omega^2 = 0, \quad (2.4.4)$$

Considerando el complejo conjugado de la ecuación (2.2.4):

$$\nabla_T^2 \xi_1^* + [\omega^2 \mu_0 \epsilon(\mathbf{r}) - k^2] \xi_1^* + 2ik \frac{\partial \xi_1^*}{\partial z} - \mu_0 \mathcal{P} \omega^2 = 0. \quad (2.4.5)$$

La ecuación (2.4.5) es la ecuación de onda para la misma onda pero propagándose en la dirección (-z) de la forma:

$$E_2(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \xi_2(\mathbf{r}) \exp[-i(\omega t + kz)] + c. c. \quad (2.4.6)$$

Siempre y cuando $\xi_2(\mathbf{r}) = a \xi_1^*(\mathbf{r})$, donde a es una constante. Por lo tanto, la onda que se propaga en dirección contraria a la dirección de propagación original con amplitud compleja ξ_2 es en todo momento el complejo conjugado de ξ_1 que satisface la misma ecuación de onda que obedece ξ_1 . Esta prueba matemática indica que si propagamos un haz E_1 y se logra generar un haz E_2 que sea el conjugado de fase de E_1 entonces se propagará de regreso y su amplitud compleja permanecerá en todo momento como el complejo conjugado del primer haz. Por lo tanto, el frente de onda coincide en cualquier parte del espacio con el frente de onda de E_1 .

2.5. Algoritmos para reenfoque luz a través de un medio esparcidor.

El enfoque de luz a través de un medio esparcidor requiere de la implementación de un algoritmo que permita modelar o sintetizar un frente de onda óptimo que compense todos los desfases espaciales introducidos por el medio esparcidor. La mayoría de los algoritmos para lograr enfoque a través de una muestra esparcidora se clasifican en algoritmos de optimización de segmentos de fase y análisis de la matriz de transmisión del sistema como se reportan en [15] y [16]. Estos algoritmos basan su éxito en el funcionamiento de un modulador espacial de luz y el acoplamiento de este con un detector y el programa de control de modo que en conjunto formen un sistema de retroalimentación y optimización.

El modulador espacial de luz y el detector son elementos ópticos necesarios para lograr este objetivo, para ello se requiere acoplar el modulador y el detector.

Con el modulador se debe sintetizar un frente de onda óptimo y el detector sirve para monitorear constantemente la intensidad en la región de interés, ambos elementos serán manipulados mediante un programa de control el cual incluye el algoritmo de optimización.

En general, un algoritmo para lograr controlar la propagación de la luz y lograr enfoque a través de un medio esparcidor pretende encontrar la fase óptima para un determinado número de segmentos cuadrados de fase manipulador mediante el SLM. El criterio de optimización de un segmento arbitrario se basa en la evaluación de la intensidad para diferentes valores de fase (niveles de gris) de modo que el óptimo sea aquel que proporcione la máxima intensidad en la región de interés sobre el detector, después de optimizar cada segmento se encuentra la distribución de fase óptima para modelar el frente de onda que compense los desfases introducidos por el medio esparcidor, la distribución de fase que se obtiene es del tipo de imagen presentada en la figura [4].

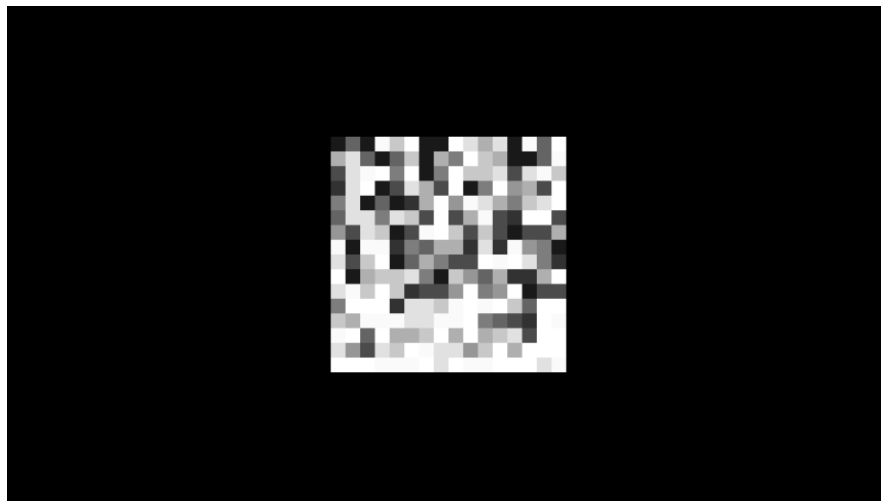


Figura 4. Ejemplo de imagen de distribución de fase para sintetizar un frente de onda óptimo para lograr enfoque en una región de interés particular.

El SLM es una matriz rectangular de píxeles que permite controlar electrónicamente cada uno de estos de manera local para desplegar funciones de fase, en la sección 3.1 se describen sus características físicas y electroópticas que

definen su funcionamiento. El control local de un píxel permite también controlar bloques o segmentos de píxeles, para el objetivo de este trabajo el control del modulador se hace en la región central de este, utilizando una matriz cuadrada de $N \times N$ píxeles, a su vez se subdivide a esta región cuadrada en segmentos menores de $n \times n$ píxeles. El valor de N (512 píxeles) para todos los experimentos que se reportan en este trabajo es el mismo, sin embargo, n puede variar para obtener un mayor o menor número de bloques a controlar según la optimización que se requiera. Para controlar los segmentos cuadrados de la región de modulación se utilizan los algoritmos de optimización, ejemplos de este tipo de algoritmos son: algoritmo secuencial paso a paso, el algoritmo secuencial continuo y el algoritmo aleatorio que son reportados en [1].

La región de modulación cubre un área de aproximadamente 17 mm^2 la cual es manipulada mediante el programa de control implementado en MATLAB, esta región de modulación puede subdividirse a su vez en 4, 16, 64, 256 y 1024 segmentos según requiera el tamaño de la región de interés en el detector a optimizar. Se requerirá optimizar un mayor número de segmentos de fase cuando la región de interés en el detector sea más grande que un solo píxel, cuando se tiene una región de interés mayor hay más desfases que compensar y por lo tanto la contribución de un solo segmento es menor que en el caso de una región de interés menor en el detector.

Para tener un control sobre la convergencia del algoritmo es necesario cuantificar la intensidad en términos del nivel de gris registrado por el detector antes, durante y al final de la optimización, el parámetro que cuantifica dicho control se denomina factor de mejora y que en términos simples se expresa como:

$$\eta = \frac{\langle G_i \rangle}{\langle G_0 \rangle}, \quad (2.5.1)$$

donde $\langle G_i \rangle$ representa el nivel de gris promedio registrado por el detector en cada una de las iteraciones y $\langle G_0 \rangle$ representa el nivel de gris promedio inicial en la región de interés.

2.5.1. Algoritmo de optimización paso a paso.

El algoritmo paso a paso consiste en controlar los bloques uno a uno de manera consecutiva modificando el valor de fase de un solo segmento a la vez, al inicio de la optimización cada segmento tiene un valor de fase correspondiente a un nivel de gris cero. Cuando la optimización comienza, se selecciona el primer segmento y se generan m valores prueba (niveles de gris) que proporcionan una fase diferente para este segmento particular, durante cada modificación con ayuda del detector se monitorea y guarda el nivel de gris en la región de interés tomando una fotografía para cada valor prueba. Una vez modificada m veces la fase, se selecciona el m -ésimo valor prueba que proporcione el nivel de gris más alto en la región de interés, el nivel de gris correspondiente al valor prueba se almacena y el segmento regresa a un nivel de fase original sin desplegar la fase óptima para ese segmento y la optimización continúa con el segmento consecutivo. Cuando se tiene el valor óptimo de fase para cada uno de los segmentos la imagen que había sido guardada hasta la última iteración es desplegada en el SLM modificando todos los segmentos a la vez colocando en vez del valor inicial de fase el valor óptimo que permita enfocar la luz en la región de interés.

2.5.2. Algoritmo de optimización secuencial.

El principio de funcionamiento del algoritmo secuencial es similar al algoritmo paso a paso, se selecciona un solo segmento al que se le cambia m veces la fase o nivel de gris con valores prueba, en particular para los experimentos reportados en este trabajo de tesis $m=10$, tomando valores discretos de 0 a 255 en pasos de 25 en 25; es decir, se comienza con un valor prueba en nivel de gris 25, posteriormente se cambia a un nivel de gris 50, 75, 100 y así sucesivamente hasta llegar a un nivel de gris de 250, el valor cero es desplegado sobre toda la pantalla antes de iniciar la optimización para tener una referencia inicial. Para cada valor prueba se mide el nivel de gris en la región de interés con ayuda del detector, estos valores son almacenados para posteriormente seleccionar el nivel de gris que proporciona el máximo nivel de gris en la región de interés y el resto son desechados, a diferencia del algoritmo paso a paso, con este algoritmo la actualización del valor de fase óptimo se hace inmediatamente para cada segmento y se continúa con la optimización para el segmento consecutivo.

El algoritmo secuencial resulta conveniente para optimizar patrones de esparcimiento dinámico debido a que la actualización se hace en tiempos relativamente cortos. Sin embargo, esto depende del tiempo en que se realice una iteración y la velocidad de cambio del patrón de esparcimiento generado por el medio esparcidor dinámico. En las pruebas realizadas para este trabajo se obtuvieron tiempos de iteración de aproximadamente 7 segundos que contempla evaluar 10 niveles de fase, seleccionar el óptimo, fijar ese valor al segmento en cuestión y tomar una fotografía de su correspondiente distribución de intensidad.

2.5.3. Algoritmo de optimización aleatorio.

El algoritmo aleatorio es utilizado para lograr enfoque de luz coherente a través de muestras altamente esparcidoras, este algoritmo selecciona del total de los segmentos el cincuenta por ciento de estos para cambiarles la fase. La distribución de segmentos se elige de forma aleatoria en cada iteración, una vez seleccionada una distribución de segmentos se envían los m valores de prueba para encontrar la configuración óptima que permita incrementar la intensidad en la región de interés. Cuando se encuentra la configuración óptima de fase para esa distribución de segmentos se selecciona una nueva distribución de segmentos y se realiza otra iteración. El proceso puede ser repetido indefinidamente y en cada iteración se selecciona el cincuenta por ciento del total de los segmentos por lo que es posible que algunos de ellos se repitan en diferentes iteraciones. La ventaja de este algoritmo respecto a los anteriores, es que la optimización de un solo segmento contribuye poco al incremento de la intensidad en la región de interés y por consiguiente con este algoritmo el incremento de la intensidad en la región de interés se da de manera más rápida según reportan en [1].

2.5.4. Factor de mejora para el algoritmo secuencial.

El factor de mejora para el algoritmo secuencial dependerá del número de segmentos utilizados en la optimización. El campo al atravesar el medio esparcidor, dependerá de cada uno de los segmentos de fase modificados en el SLM y del esparcimiento generado por el medio. Suponiendo que el SLM se encuentra iluminado de manera uniforme en la región de modulación, cada uno de los segmentos portará $A_i = 1/\sqrt{N}$ de la intensidad total normalizada y la fase de cada segmento estará caracterizada por φ_i . Al atravesar la muestra la luz incidente será esparcida, dicho esparcimiento es descrito mediante los elementos de la matriz de

transmisión t_{mi} , la cual contiene información de la luz incidente y la luz transmitida al otro lado de la muestra.

Así el campo al atravesar la muestra será:

$$E_m = \sum_i^N t_{mi} A_i e^{\varphi_i}. \quad (2.5.4.1)$$

Cada E_m representa el campo transmitido al otro lado de la muestra para un punto particular, con intensidad de transmisión para cada punto:

$$\Phi = |E_m|^2 = \left| \sum_i^N t_{mi} A_i e^{\varphi_i} \right|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_i^N t_{mi} e^{\varphi_i} \right|^2. \quad (2.5.4.2)$$

Como se definió en la ecuación (2.5.1) el factor de mejora dependerá tanto de la intensidad inicial promedio como de la intensidad promedio para la i -ésima iteración. La intensidad inicial promedio dependerá de la fase de cada uno de los segmentos de fase del modulador espacial de luz representados por $\varphi_i = 0$, debido a que el nivel inicial de fase para cada uno de los segmentos es cero correspondiente a un nivel de gris 0 (color negro), así la intensidad inicial está dada por:

$$\Phi_0 = \left| \sum_n^N t_{mi} A_i \right|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_n^N t_{mi} \right|^2 \quad (2.5.4.3)$$

La intensidad inicial promedio se puede expresar como:

$$\langle \Phi_0 \rangle = \left\langle \frac{1}{N} \left| \sum_i^N t_{mi} \right|^2 \right\rangle = \left\langle \frac{1}{N} \left| \sum_i^N t_{mi} \right| \left| \sum_i^N t_{mi} \right| \right\rangle = \left\langle \frac{1}{N} \sum_i^N |t_{mi}|^2 \right\rangle \quad (2.5.4.4)$$

Se busca que al optimizar cada segmento de fase la intensidad en la región de interés sea máxima, la intensidad para la i -ésima iteración será máxima cuando $\varphi_i = -\arg(t_{mi})$; es decir, cuando la fase de cada segmento optimizado contrarreste exactamente los desfases introducidos por la muestra. Así la intensidad

máxima para la i -ésima iteración aplicando la desigualdad triangular a la ecuación (2.5.4.2) será:

$$\Phi_i = \frac{1}{N} \left| \sum_i^N t_{mi} \right|^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right)^2. \quad (2.5.4.5)$$

Y la intensidad promedio para la i -ésima iteración será:

$$\langle \Phi_i \rangle = \left\langle \frac{1}{N} \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right)^2 \right\rangle = \left\langle \frac{1}{N} \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right) \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right) \right\rangle \quad (2.5.4.6)$$

Separando los elementos cruzados de los elementos de la diagonal para la matriz t_{mn} , la ecuación (2.5.4.6) se reescribe:

$$\begin{aligned} \langle \Phi_i \rangle &= \left\langle \frac{1}{N} \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right) \left(\sum_{l \neq i}^N |t_{ml}| \right) + \frac{1}{N} \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right) \left(\sum_i^N |t_{mi}| \right) \right\rangle \\ &= \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i,l \neq i}^N |t_{mi}| |t_{ml}| + \frac{1}{N} \sum_n^N |t_{mi}| |t_{mi}| \right\rangle \\ &= \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i,l \neq i}^N |t_{mi}| |t_{ml}| + \frac{1}{N} \sum_n^N |t_{mi}|^2 \right\rangle \\ &= \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i,l \neq i}^N |t_{mi}| |t_{ml}| \right\rangle + \left\langle \frac{1}{N} \sum_n^N |t_{mi}|^2 \right\rangle \\ &= \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i,l \neq i}^N |t_{mi}| |t_{ml}| \right\rangle + \langle \Phi_0 \rangle \end{aligned} \quad (2.4.5.7)$$

Para un medio desordenado los elementos de t_{mi} son independientes y tienen una distribución Gaussiana. Finalmente la intensidad promedio de la i -ésima iteración en función de la intensidad promedio inicial de acuerdo a [1 y 13] será:

$$\langle \Phi_i \rangle = \langle \Phi_0 \rangle \left[(N-1) \frac{\pi}{4} + 1 \right] \quad (2.4.5.8)$$

Finalmente el factor de mejora en función del número de segmentos de la ecuación (2.5.1) estará determinado por:

$$\eta = \frac{\langle \Phi_i \rangle}{\langle \Phi_0 \rangle} = (N - 1) \frac{\pi}{4} + 1. \quad (2.4.5.8)$$

Referencias

- [1] I.M. Vellekoop and A.P. Mosk. *Phase control algorithms for focusing light through turbid media*. Optics Communications. 281. 3071–3080. (2008).
- [2] I.M. Vellekoop . *Controlling the propagation of light in disordered scattering media*. Tesis Dr. Universiteit Twente, the Netherlands. 144 p.
- [3] Goodman, Joseph W. *Statistical optics*. New York: John Wiley & Sons (1985). Cap. 1, 2 y 3.
- [4] Walpole, Ronald E, et. al. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson. (2012). Cap. 11.
- [5] Fisher, Robert A. *Optical phase conjugation*. New York: Academic Press. (1983). Cap. 1.
- [6] Saleh B.E.A.; Telch, M. C. *Fundamentals of photonics*. John Wiley and Sons, Inc. (1991) Cap. 2.
- [7] Martelli, Fabrizio et. al. *Light propagation through biological tissue and other diffusive media*. United States of America: SPIE Press. (2010). Cap. 1, 2 y 3.
- [8] Kerker, Milton. *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. New York: Academic Press. (1969). Cap. 3.
- [9] I. M. Vellekoop, P. Lodahl, and A. Lagendijk. *Determination of the diffusion constant using phase-sensitive measurements*. Physical Review E 71. 056604. (2005).
- [10] Van der Molen, Karen Liana. *Experiments on scattering lasers from Mie to random*. Tesis Dr. Universiteit Twente, the Netherlands (2007). 128 p. Apendice B.
- [11] Simmons, George F. y Krantz, Steven G. *Ecuaciones diferenciales. Teoría, técnica y práctica*. México: Mc Graw-Hill. (2007)
- [12] Spiegel, Murray R. *Variable compleja*. Primera edición. Madrid: Mc Graw-Hill. (1995).
- [13] I. M. Vellekoop¹; A. Lagendijk and A. P. Mosk. *Exploiting disorder for perfect focusing*. Nature Photonics 4, 320 - 322 (2010).
- [14] Verderyen, Joseph T. *Laser electronics*. Third edition. United States of America: Prentice Hall. (1995). Cap. 3.
- [15] S. M. Popoff; G. Lerosey; R. Carminati; M. Fink; A.C. Boccara and S. Gigan. *Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control*

of light propagation in disordered media. Phys. Rev. Lett. 104, 100601. (2010).

- [16] C. Stockbridge; Y. Lu; J. Moore; S. Hoffman; R. Paxman; K. Toussaint and T. Bifano. *Focusing through dynamic scattering media.* Optics Express. Vol. 20, Issue 14. (2012).

Capítulo 3. Configuración experimental.

En el presente capítulo se describe la implementación del algoritmo secuencial a la configuración experimental y la función que desempeña cada una de las componentes ópticas del sistema. La configuración del arreglo experimental es muy similar a las configuraciones utilizadas por algunos grupos de investigación [1-3] que han trabajado con control de propagación de luz para enfocarla a través de un medio esparcidor.

El arreglo experimental básico para lograr enfoque a través de un medio esparcidor debe constar de los siguientes elementos: una fuente de luz, un sintetizador de frente de onda (SLM en este caso), un medio esparcidor, un sistema de detección y un sistema de control y retroalimentación [4]. La fuente proporciona un frente de onda plano que se propaga en el espacio hasta el SLM. Éste refleja el haz y lo hace incidir sobre el medio esparcidor, el sistema de detección recibe la luz esparcida a la salida del medio y mediante el programa de control se brinda monitoreo y retroalimentación al SLM. De esta manera se obtiene el frente de onda óptimo para lograr enfocar el haz en una región de interés a través de la muestra. La figura [5] muestra esquemáticamente la estructura de la configuración básica para implementar un algoritmo de optimización para lograr enfoque.

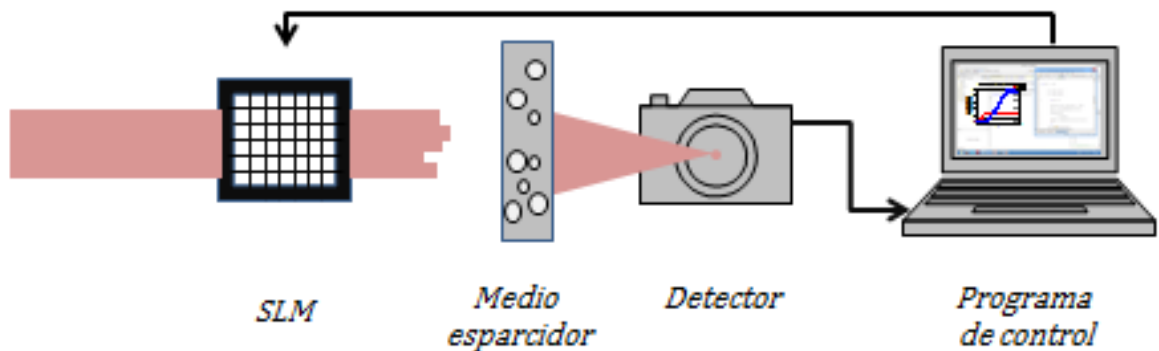


Figura 5. Elementos básicos para lograr enfoque a través de un medio esparcidor.

El funcionamiento del SLM es de suma importancia para este trabajo ya que en sí el desempeño de los algoritmos mencionados en el Capítulo 2 se basan en gran medida en el SLM, por ello en la Sección 3.1 se hace referencia a su funcionamiento, sus propiedades físicas y electro-ópticas y la caracterización del mismo. La Sección 3.2 está enfocada al sistema de detección y las características del detector utilizado para monitorear la intensidad en la región de interés. En la Sección 3.3 se describe la implementación del algoritmo secuencial al programa de control de en MATLAB. En la Sección 3.4 se describe el procedimiento para calcular el tiempo de sincronización modulador-detector. Finalmente en las Secciones 3.5 y 3.6 se describe el ensamble de todos los elementos necesarios para lograr enfoque a través del medio esparcidor utilizado en las pruebas a reportar en este trabajo.

3.1. Modulador Espacial de Luz (SLM) y su funcionamiento.

Existen diversos tipos de moduladores espaciales de luz dependiendo del efecto físico en el que basan su funcionamiento y los materiales que utilizan en su fabricación. Los moduladores se clasifican en moduladores de solo amplitud o moduladores de solo fase dependiendo de lo que vayan a modular. Entre los moduladores más comunes se encuentran los moduladores de pantalla de cristal líquido (*Liquid Crystal Display*) que se basan en efectos electro-ópticos y los moduladores de MEMS (*Micro Electro-Mecanical System*) que se basan en un sistema de operación electromecánico. Es de particular interés para este trabajo el funcionamiento de los moduladores espaciales de luz de pantalla de cristal líquido ya que en la configuración del arreglo experimental empleado se utiliza un modulador espacial de luz de cristal líquido LCOS (*Liquid Crystal-on-Silicon*).

Los cristales líquidos se clasifican de acuerdo a su orden molecular en cristales nemáticos, colestéricos y esméticos [5].

- Cristales líquidos nemáticos: Las moléculas tienden a alinearse unas paralelas a otras, con un rango orientacional largo, con simetría uniaxial. Los centros de masa de las moléculas no tienen un rango alto de correlación; es decir, se encuentran distribuidos al azar. La dirección del eje principal \hat{n} (eje director) es arbitraria en el espacio tanto para este tipo de cristal como para los cristales esméticos ya que no hay dirección preferencial para este.

- Cristales líquidos colestéricos: La estructura molecular es periódica; es decir, las moléculas se posicionan en capas paralelas y las moléculas en cada capa se orientan de forma diferente variando el eje director \hat{n} siguiendo una hélice.
- Cristales esméticos: Las moléculas se encuentran concentradas en capas con una dirección particular \hat{n} . Dentro de cada capa las moléculas son alineadas paralelas unas a otras pero normales a la capa contigua. Las moléculas se encuentran distribuidas de forma aleatoria sin tener correlación entre sus centros de masa.

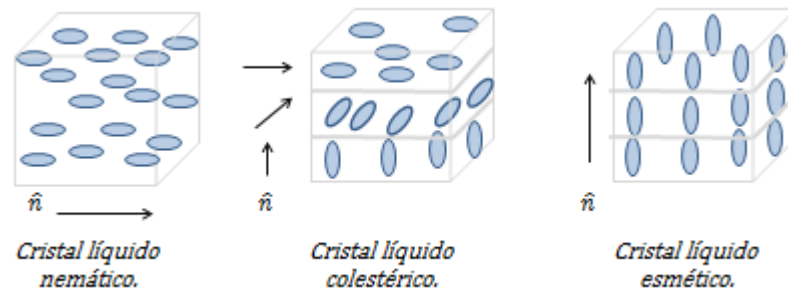


Figura 6. Estructura molecular de los cristales líquidos nemático, colestérico y esmético.

La figura [6] muestra la estructura molecular de los tres tipos de cristal líquido. El funcionamiento de los moduladores espaciales de luz de cristal líquido dependen en gran medida tanto de las propiedades físicas como de las propiedades electro-ópticas del cristal líquido, por ello es de suma importancia describir dichas propiedades. En general los tres tipos de cristales líquidos son anisótropos puesto que propiedades como la polarizabilidad y velocidad de propagación de la luz dependerá en gran medida de la estructura molecular del cristal líquido ya que en general la luz encontrará una estructura asimétrica.

El cristal líquido nemático es un medio óptico anisótropo y actúa localmente como un cristal uniaxial con el eje óptico paralelo a la dirección de orientación de las moléculas. Los cristales líquidos con cierta simetría tienen dos índices de refracción uno ordinario (n_o) y otro extraordinario (n_e), permitiendo modos que darán lugar a dos tipos de onda, una ordinaria y otra extraordinaria cuando la luz incida sobre el cristal. [6]

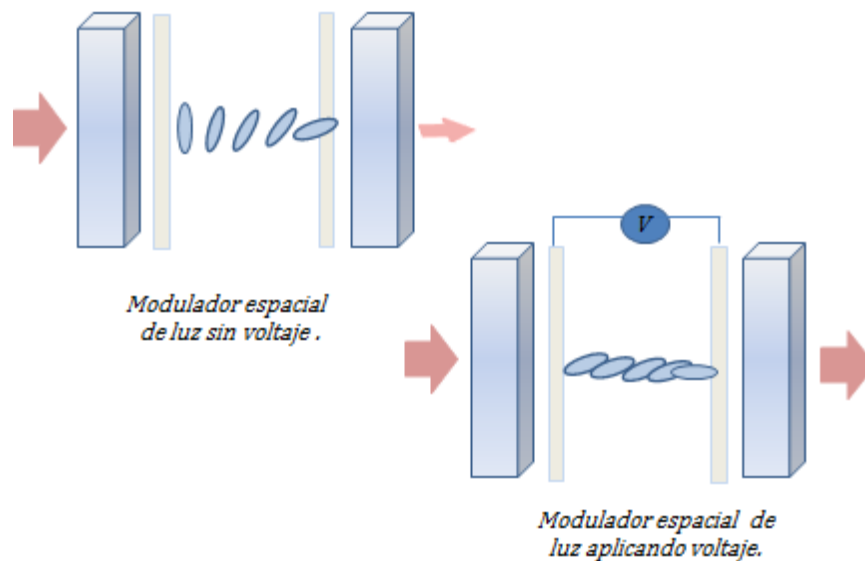


Figura 7. Estructura básica de un modulador espacial de luz de cristal líquido nemático.

La estructura de un modulador de cristal líquido nemático con torsión se ilustra en la Figura [7], el modulador está constituido por dos placas de vidrio paralelas separadas por un electrodo transparente, una capa de cristal líquido y un circuito cubierto con otro electrodo transparente. Al colocar electrodos transparentes sobre las placas de vidrio, estas brindan la capacidad de controlar eléctricamente el dispositivo y con ello controlar la alineación e inclinación de las moléculas de cristal líquido al aplicar voltaje. Uno de los electrodos está dispuesto sobre un arreglo de píxeles de modo que se pueda controlar el cristal líquido eléctricamente píxel a píxel de manera individual. Cuando se aplica un campo eléctrico en la dirección z las moléculas tienden a reorientarse para alinearse con el campo eléctrico incidente cuando este es lo suficientemente grande, excepto las

moléculas adyacentes a las placas de vidrio, con ello se distinguen dos fases en la inclinación:

$$\theta = \begin{cases} 0, & V \leq V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} e^{\left(\frac{V-V_c}{V_0}\right)}, & V > V_c. \end{cases}$$

Donde V es el Voltaje aplicado, V_c es el voltaje crítico en el cual se empieza a dar la reorientación de las moléculas de cristal líquido y V_0 es un valor constante. Cuando el campo eléctrico es removido, las moléculas de cristal líquido tienden a recuperar su posición original.

La figura [7] muestra el principio de funcionamiento del modulador de cristal líquido nemático con torsión. Al aplicar voltaje las moléculas tenderán a reorientarse en la dirección del campo eléctrico incidente desapareciendo el estado de giro de las partículas similar al estado natural del cristal líquido colestérico y de esta forma se asegura que el estado de polarización incidente no cambie. El SLM utilizado en las pruebas está optimizado para luz incidente en estado de polarización lineal horizontal.

3.1.1. Características y parámetros del Modulador Espacial de luz PLUTO.

En el presente trabajo se utiliza un modulador espacial de luz de la marca comercial Holoeye, el modelo del dispositivo es PLUTO NIR optimizado para una longitud de onda de entre 1000 a 1064 nm . El modulador espacial de luz es un dispositivo reflectivo de pantalla de cristal líquido nemático sobre silicón (LCOS), la resolución que brinda es de 1920×1080 pixeles dispuestos en una celda, cada uno de los pixeles es cuadrado de 8 μm de ancho, dando así una celda de 15.36 mm × 8.64 mm .

El modulador es controlado mediante una computadora, la cual envía la señal vía DVI (*Digital Visual Interface*); la pantalla LCOS trabaja como un monitor extendido que despliega funciones de fase (hologramas, rendijas e imágenes de

fase). El dispositivo es capaz de desplegar imágenes de fase con 256 niveles de gris en una escala de 0 a 255 (imágenes de 8 bits) con un rango de despliegue de imágenes de 60Hz [8].

3.1.2. Caracterización del Modulador Espacial de Luz.

La caracterización es de suma importancia debido a que como se mencionó previamente los moduladores espaciales de luz tienen la capacidad de modular en amplitud o en fase, para asegurar que la modulación sea en su mayoría en fase o en amplitud se requiere minimizar ya sea una u otra función de la pantalla de cristal líquido. Con la caracterización del dispositivo se asegura que se está modulando mayormente en amplitud o fase según se requiera. La mayoría de las técnicas de caracterización de una pantalla de cristal líquido se basan en métodos interferométricos; sin embargo, este tipo de técnicas requieren agregar componentes ópticas o hacer modificaciones al diseño del arreglo experimental.

Existe un método de caracterización práctico y rápido que permite conocer el rango aproximado de modulación de una pantalla de cristal líquido sin necesidad de hacer modificaciones significativas al arreglo experimental utilizado para este trabajo. Este método aprovecha las propiedades difractivas del efecto fraccional de Talbot mediante el análisis de la distribución de intensidad generada por rejillas binarias de transmitancia compleja a la distancia $z = Z_T/4$, donde Z_T es la distancia de autoimagen de Talbot [7]. El procedimiento de caracterización consiste en desplegar rejillas binarias de transmitancia compleja en el modulador espacial de luz. En este caso las imágenes son enviadas vía DVI mediante *Holoeye SLM application software*, que es el software de control del modulador espacial de luz que proporciona la empresa de fabricación. La pantalla de cristal líquido debe ser iluminada previamente con un frente de onda plano coherente. Con la ayuda de un detector, se monitorea la distribución de intensidad que genera cada rejilla de transmitancia compleja a la distancia $z = Z_T/4$.

Las rejillas desplegadas en la pantalla de cristal líquido tienen una celda básica que consta de dos franjas de diferente valor de amplitud y diferente valor de fase. Para la primera franja se tiene un valor de amplitud G_{T1} y para la segunda un valor de amplitud G_{T2} . Cada una con un valor propio de fase ϕ_1 y ϕ_2 ,

respectivamente. Los valores de amplitud están representados por un nivel de gris particular, dado que se requiere una rejilla binaria de transmitancia compleja, se debe asignar amplitudes diferentes para las franjas de la celda básica. Es decir, para cada una de las franjas se asigna un nivel de gris diferente de modo que la diferencia de amplitudes entre las franjas genere escalones de fase. Es necesario mantener una franja con un nivel de gris fijo en la celda básica mientras que el otro se debe variar para generar una diferencia de fase.

Para la caracterización de la pantalla de cristal líquido nemático se utilizaron 52 rejillas binarias de transmitancia compleja con un tamaño de 1920×1080 píxeles, con una celda básica de 60 píxeles; es decir, el tamaño de cada franja de la celda básica fue de 30 píxeles. La figura [8] muestra algunas de las rejillas binarias de transmitancia compleja utilizadas en la caracterización del SLM Holoeye PLUTO NIR.

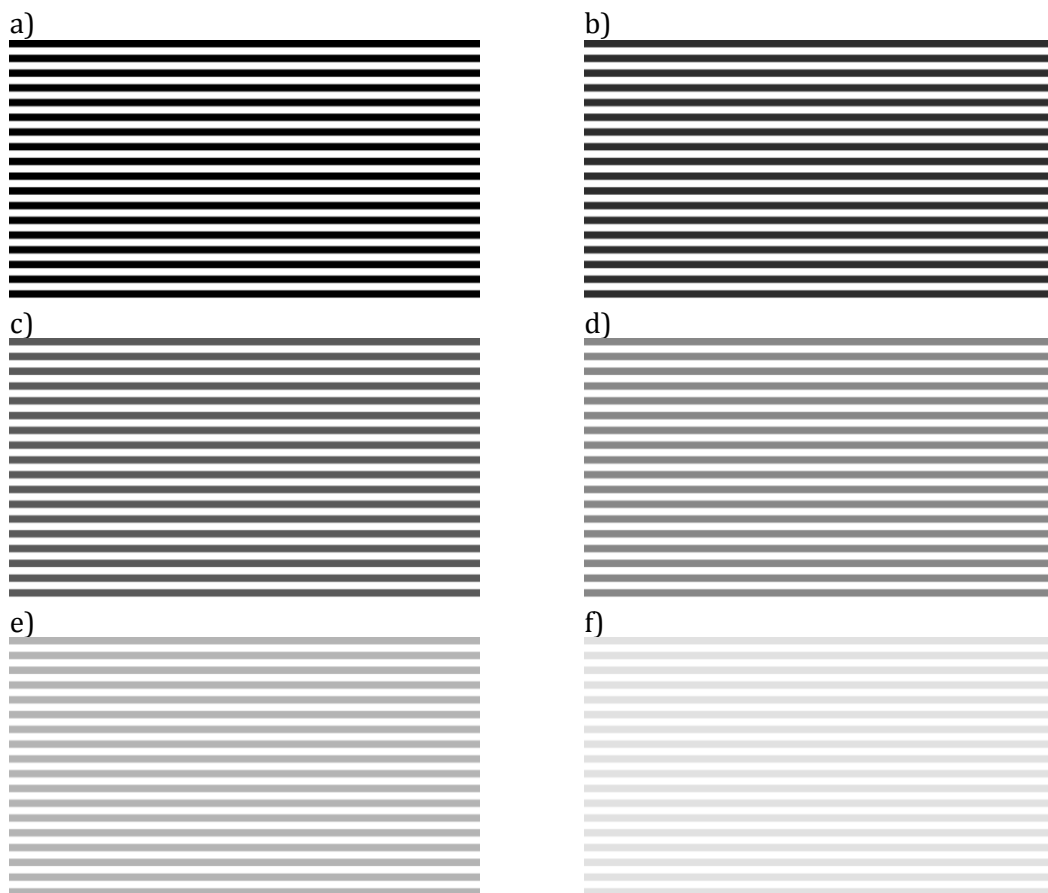


Figura 8. Rejillas binarias de transmitancia compleja utilizadas en la caracterización del SLM, la celda básica consta de dos niveles de gris diferente permaneciendo fijo el nivel 255 y variando la otra franja con los niveles de gris a) 0, b) 45, c) 90, d) 135, e) 180 y f) 225.

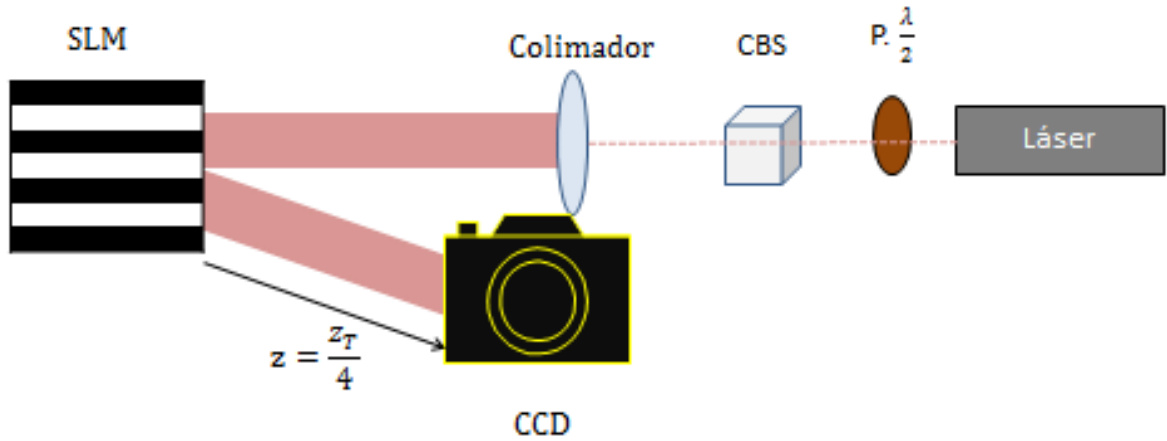


Figura 9. Arreglo experimental utilizado para caracterizar el SLM.

El arreglo experimental que se muestra en la Figura [9] fue el utilizado para la caracterización del SLM que fue realizada antes de implementar el algoritmo secuencial al arreglo experimental para lograr enfoque a través de un medio esparcidor, la configuración es muy similar a la configuración experimental utilizada en los experimentos para lograr enfoque como se describe en la sección 3.5.

Al desplegar las rejillas binarias de transmitancia compleja se genera a la distancia $z = Z_T/4$ una distribución de intensidad periódica y binaria, es por ello que el detector debe estar colocado a esa distancia del modulador espacial de luz. Para obtener el rango aproximado de modulación en fase de la pantalla de cristal líquido es necesario analizar la distribución de intensidad periódica y binaria que genera cada rejilla, para ello se analiza la visibilidad de las franjas dada por:

$$V = \frac{2G_{T1}G_{T2}\sin(\phi)}{G_{T1}^2 + G_{T2}^2} \quad (3.1.2.1)$$

Donde G_{T1} y G_{T2} son las amplitudes de las franjas de la celda básica y ϕ representa el escalón de fase que generan las franjas para una rejilla binaria de transmitancia compleja. El análisis de la visibilidad de las franjas permite obtener el rango de modulación de la pantalla de cristal líquido, por lo cual para cada rejilla se tomó una fotografía de la distribución de intensidad generada. El análisis de la visibilidad se

realizó mediante un programa implementado en MATLAB, el cual requiere analizar el contraste de las franjas para cada una de las fotografías que contienen la información de la distribución de intensidad de cada rejilla binaria de transmitancia compleja. Los resultados para la caracterización del modulador espacial de luz se presentan en el capítulo 4 en la sección 4.1.

3.2. Sistema de detección y monitoreo de intensidad.

Los dispositivos de detección ópticos son herramientas que permiten detectar y monitorear señales, imágenes y variaciones en un sistema. Existen varios tipos de detectores ópticos, estos se clasifican en detectores térmicos y detectores fotoeléctricos.

Detectores térmicos: En general esta clase de detectores comprende a aquellos cuyo efecto principal es el incremento de temperatura causado por la radiación absorbida. Para una absorción efectiva esta clase de detectores ocupan materiales *negros*. El incremento de temperatura es utilizada en diferentes efectos secundarios para obtener una señal eléctrica. Para esta clase de detectores los fotones incidentes no son quienes causan la generación directa de portadores de carga para dar una señal de salida sino que otra clase de efectos están involucrados. Entre sus principales desventajas se encuentra un tiempo relativamente largo debido al tiempo que necesitan para cambiar su temperatura y su principal ventaja es el alto grado de eficiencia que tienen.

Detectores fotoeléctricos: En este tipo de detectores se utilizan materiales que tengan la capacidad de absorber fotones y mediante transiciones electrónicas a un nivel más alto de energía generan portadores de carga que se desplazarán y generarán una corriente eléctrica medible. Las interacciones de los fotones a diferencia de los detectores térmicos se dan de manera directa entre los átomos y moléculas del material que provee los portadores de carga. A este tipo de detectores se les denomina frecuentemente como *fotodetectores*. La ventaja de este tipo de detectores es la velocidad de respuesta y la velocidad de señal de salida [9].

La función de un detector consiste de varias etapas, la primera de ellas es la detección, la señal óptica es convertida a una señal eléctrica, posteriormente se debe filtrar la señal armónica de las que no lo son y que se conoce como ruido y finalmente se debe amplificar la señal para hacerla una señal transportable; es decir, que la señal sea más fuerte que las señales ruidosas, finalmente el dispositivo tomará esta señal de referencia para clasificar a las señales adecuadas de las que no.

Un sistema de detección de multicanales se puede entender como un arreglo de varios canales individuales en el que cada canal sea capaz de llevar a cabo cada una de las funciones que desempeña un solo sistema de detección. Uno de estos elementos de multicanales son los dispositivos de carga acoplada o CCD (*Charge Coupled Device*) [10].

Como se mencionó previamente, el sistema de detección era una de las componentes básicas para lograr enfoque a través de una medio esparcidor, en este caso se utilizó una cámara CCD modelo Retiga 2000R monocromática, este dispositivo es una cámara ultra rápida con un rango de captura de hasta 190 cuadros por segundo. La cámara tiene una resolución de 1600 x 1200 píxeles cuadrados sensitivos a la luz (1.92 millones) con un ancho de 7.4 μm de lado.

3.3. Programa de control y retroalimentación.

El programa de control fue realizado en MATLAB, el cual se basa en un lenguaje de programación matricial. La ventaja que ofrece MATLAB es que es una opción integral de control; es decir, mediante un programa principal se implementa el algoritmo secuencial, se maneja el modulador espacial de luz y el sistema de detección. El programa de control se basa en un programa principal y varias funciones que permiten controlar los parámetros requeridos para hacer una prueba, la región de trabajo del SLM, el despliegue de imágenes de fase en el SLM, el sistema de detección, el análisis inmediato del factor de mejora y de la intensidad en el píxel a optimizar y finalmente la opción gráfica de video para corroborar el éxito de la prueba.

Dado que el algoritmo secuencial es iterativo, se requiere definir el número de iteraciones a realizar; estas pueden variar desde 4 hasta 1024 iteraciones. Se define un sistema de referencia de intensidad inicial tomando una fotografía de la distribución de intensidad correspondiente a la imagen de fase en el SLM en cero. Mediante la imagen de intensidad de referencia se define cuál será el área de interés en la que se optimizará la intensidad (el algoritmo busca el píxel con el nivel de gris más bajo en la imagen), posteriormente mediante la función de delimitación de región de trabajo del SLM se delimita la región de modulación a un área de 512×512 píxeles en la región central de este. Una función de despliegue de imágenes envía los 10 valores prueba de fase, cada uno representado por un nivel de gris comenzando desde 25 hasta 250 en pasos de 25 niveles. Cada que se envía un valor prueba de gris se activa la función del sistema de detección; la cual toma una fotografía de la distribución de intensidad y captura el valor de intensidad en el área de interés temporalmente. Una vez evaluados los 10 valores de fase diferente para un solo segmento, tomada una foto para cada valor de fase y guardando temporalmente el valor de intensidad en el área de interés se busca entre los 10 valores prueba cuál de ellos proporciona el valor más alto de intensidad en la región de interés y finalmente el valor de fase óptimo es fijado al segmento particular.

Se denomina iteración al proceso de encontrar el valor óptimo de fase para un solo segmento; cuando este es encontrado, el algoritmo continúa con el siguiente segmento de forma secuencial. Al finalizar el número de iteraciones definidas al inicio del programa de control, la imagen de fase debe contener la distribución de fase óptima que compense los desfases introducidos por el medio esparcidor para lograr enfoque en la región de interés.

3.4. Tiempo de sincronización modulador-detector.

Un factor importante en la implementación del algoritmo secuencial es el tiempo de actualización del SLM y la sincronización de dicha actualización con la velocidad de captura del detector. Para la sincronización modulador-detector se realizó una prueba de caracterización de tiempo entre el despliegue de una imagen en el SLM y el tiempo que le toma al detector capturar la imagen correcta con la información proveniente del modulador.

La prueba de sincronización consistió en enviar una secuencia imágenes de fase numeradas al SLM y tomar inmediatamente una fotografía de la distribución de intensidad. Para tener control sobre el tiempo entre el despliegue de una imagen de fase y la captura de la fotografía se ocupó una pausa; con ello se asegura que no interfiera la información de despliegue de una imagen con otra que es lo que se busca implementar en el algoritmo secuencial. La importancia de esta prueba se debe a que se despliegan 10 imágenes de fase e inmediatamente después del despliegue de cada imagen de fase se toma una fotografía para monitorear la intensidad en la región de interés; si el tiempo de sincronización no es adecuado se puede obtener información retrasada que altere los resultados finales de la optimización. La prueba de sincronización de tiempo también fue realizada en MATLAB dado que el control de la cámara y el modulador espacial de luz se maneja desde el mismo entorno de programación. El tiempo de acoplamiento modulador-cámara es de mínimo 0.2 segundos.

3.5. Ensamble de las componentes básicas para lograr enfoque de luz a través de un medio esparcidor.

El arreglo experimental utilizado en los experimentos a reportar en el siguiente capítulo contiene los elementos básicos para lograr enfoque a través de un medio esparcidor además de otras componentes ópticas como se describe a continuación:

Una fuente de luz coherente infrarroja de 1064 nm se propaga hasta un sistema de filtrado espacial; mediante un objetivo de microscopio se expande el haz y se filtra con un pinhole (15 μm de diámetro), el haz filtrado se expande y posteriormente es colimado con una lente de 15 cm de longitud focal. Una vez generado un frente de onda plano se coloca un diafragma circular de radio de aproximadamente 0.9 cm para obtener un spot uniforme con una distribución de intensidad gaussiana que ilumine la región central del modulador espacial de luz. El spot se propaga desde el diafragma hasta el modulador espacial de luz y después es reflejado sobre la superficie del mismo a un ángulo menor a 12° , el spot reflejado entra a un sistema telescópico demagnificador. El telescopio está formado por dos lentes positivas, dispuestas de forma que demagnifiquen el tamaño del spot original a la mitad, las lentes utilizadas son de 20 y 10 cm respectivamente. El spot demagnificado mide aproximadamente 0.5 cm y entra a un conjunto de objetivos de

60x y 20x respectivamente; toda la información reflejada del modulador es recopilada con el primer objetivo y a la distancia de trabajo de este se coloca el medio esparcidor, la imagen es recuperada con el segundo objetivo y finalmente se coloca la cámara CCD. Tanto el SLM como la cámara están conectados al programa de control y mediante este son manipulados para implementar el algoritmo secuencial. La configuración del arreglo experimental se muestra en la Figura [10].



Figura 10. Arreglo experimental utilizado en los experimentos para lograr enfoque a través de una medio esparcidor.

3.6. Muestra y estabilidad del sistema.



Figura 11. Cinta Scotch 3M utilizada como medio esparcidor.

En el proceso de optimización para lograr enfoque a través de una muestra esparcidora estática se requiere asegurar la estabilidad del sistema, con este fin se implementó en MATLAB un algoritmo para medir el coeficiente de correlación entre dos imágenes de la distribución de intensidad del esparcimiento generado por cinta mágica Scotch 3M con un grosor promedio de 0.111 mm , la figura [11] muestra el medio esparcidor utilizado.

Una vez alineada y dispuesta la configuración experimental, se coloca el medio esparcidor y este esparcirá la luz incidente, si el patrón de interferencia está en constante movimiento significa que el sistema no es estable y que alguna de sus componentes provoca esas variaciones. El algoritmo para monitorear la estabilidad del sistema toma una sección de una fotografía de la distribución de intensidad de esparcimiento de la muestra, da una pausa de 7 segundos y toma otra fotografía de la distribución de intensidad nuevamente, hace una correlación matricial de las dos secciones de las imágenes y calcula la correlación pixel a pixel. El algoritmo va calculando el coeficiente de correlación de la imagen 1 con la n-ésima (omitiendo la correlación con la primera imagen) y finalmente entrega una gráfica del coeficiente de correlación en función del número de imagen.

Los resultados del coeficiente de correlación variaron dependiendo de la potencia del láser, en general para la potencia máxima del láser empleado se encuentran valores de correlación muy altos y conforme va disminuyendo la potencia el coeficiente de correlación es menor. Los valores de correlación para el sistema se encontraron entre 1 y 0.7 indicando un alto grado de correlación entre las imágenes de esparcimiento, lo cual permite inferir que el sistema es altamente estable.

Referencias

- [1] I.M. Vellekoop . *Controlling the propagation of light in disordered scattering media*. Tesis Dr. Universiteit Twente, the Netherlands. 144 p.

- [2] C. Stockbridge; Y. Lu; J. Moore; S. Hoffman; R. Paxman; K. Toussaint and T. Bifano. *Focusing through dynamic scattering media*. Optics Express. Vol. 20, Issue 14. (2012).

- [3] S. M. Popoff; G. Lerosey; R. Carminati; M. Fink; A.C. Boccara and S. Gigan. *Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media*. Phys. Rev. Lett. 104, 100601. (2010).

- [4] I.M. Vellekoop and A.P. Mosk. *Phase control algorithms for focusing light through turbid media*. Optics Communications. 281. 3071–3080. (2008).

- [5] Priestley, E.B., et. al. Introduction to liquid crystals. New York: Plenum press. (1974) Cap 1.

- [6] Saleh B.E.A.; Telch, M. C. *Fundamentals of photonics*. John Wiley and Sons, Inc. (1991) Cap. 6.

- [7] Vázquez Olivos, María de los Ángeles Josefina. *Caracterización de una pantalla de cristal líquido nemático como modulador de fase*. Tesis Mag. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica Y Electrónica. 165 p.

- [8] Pluto Phase Only Spatial Light Modulators. Device operating instructive. Holoeye.

- [9] Budde, W. *Optical Radiation Measurements: Physical Detectors of Optical Radiation*. Vol. 4. Orlando, FL: Academic Press. (1983). Cap. 1.

- [10] Trishenkov, M. A. *Detection of low-level optical signals: photodetectors, focal plane arrays and systems*. (1997) Cap 1 y 2.

Capítulo 4. Resultados.

Lograr enfoque experimentalmente a través de un medio esparcidor requiere la supervisión de algunas características del arreglo experimental; entre ellas se encuentra el monitoreo de la estabilidad del sistema, la caracterización del SLM, la sincronización del SLM con el detector y extremo cuidado en la alineación de cada componente óptica que conforma la configuración experimental. La importancia de verificar cada uno de estos factores radica en que si uno de ellos falla no se logrará enfocar luz a través del medio esparcidor utilizado.

Se mencionó en los capítulos anteriores la importancia que recae sobre el desempeño del SLM, en particular la caracterización y sincronización de este con el detector. La caracterización del SLM es necesaria para asegurar que las imágenes de fase que despliega se encuentran en el rango adecuado de modulación de fase, en este caso asegurar que el rango de modulación es de 0 a 2π . La sincronización modulador-detector es necesaria para asegurar una correspondencia temporal entre las imágenes SLM y la correspondiente distribución de intensidad registrada por el detector.

La estabilidad del sistema dependerá de la alineación de las componentes ópticas y la calidad del haz que se propaga a través de estas, para cuantificar dicha estabilidad tomamos como parámetro el coeficiente de correlación comparando 2 fotografías de la distribución de intensidad del esparcimiento generado por el medio esparcidor durante 30 y 120 minutos. Si el sistema es estable, el coeficiente de correlación permanecerá constante, si el sistema no es estable existirán fluctuaciones en el coeficiente de correlación.

4.1. Resultados de la caracterización del Modulador Espacial de Luz

La caracterización del modulador espacial de luz se llevó a cabo con el método implementado en [1]. Este método analiza la visibilidad de las franjas de la distribución de intensidad que genera cada una de las 52 rejillas binarias de transmitancia compleja a la distancia $Z = \frac{Z_T}{4} \approx 11 \text{ cm}$, las distribuciones de intensidad para las rejillas son como las imágenes que se muestran en la figura [12].

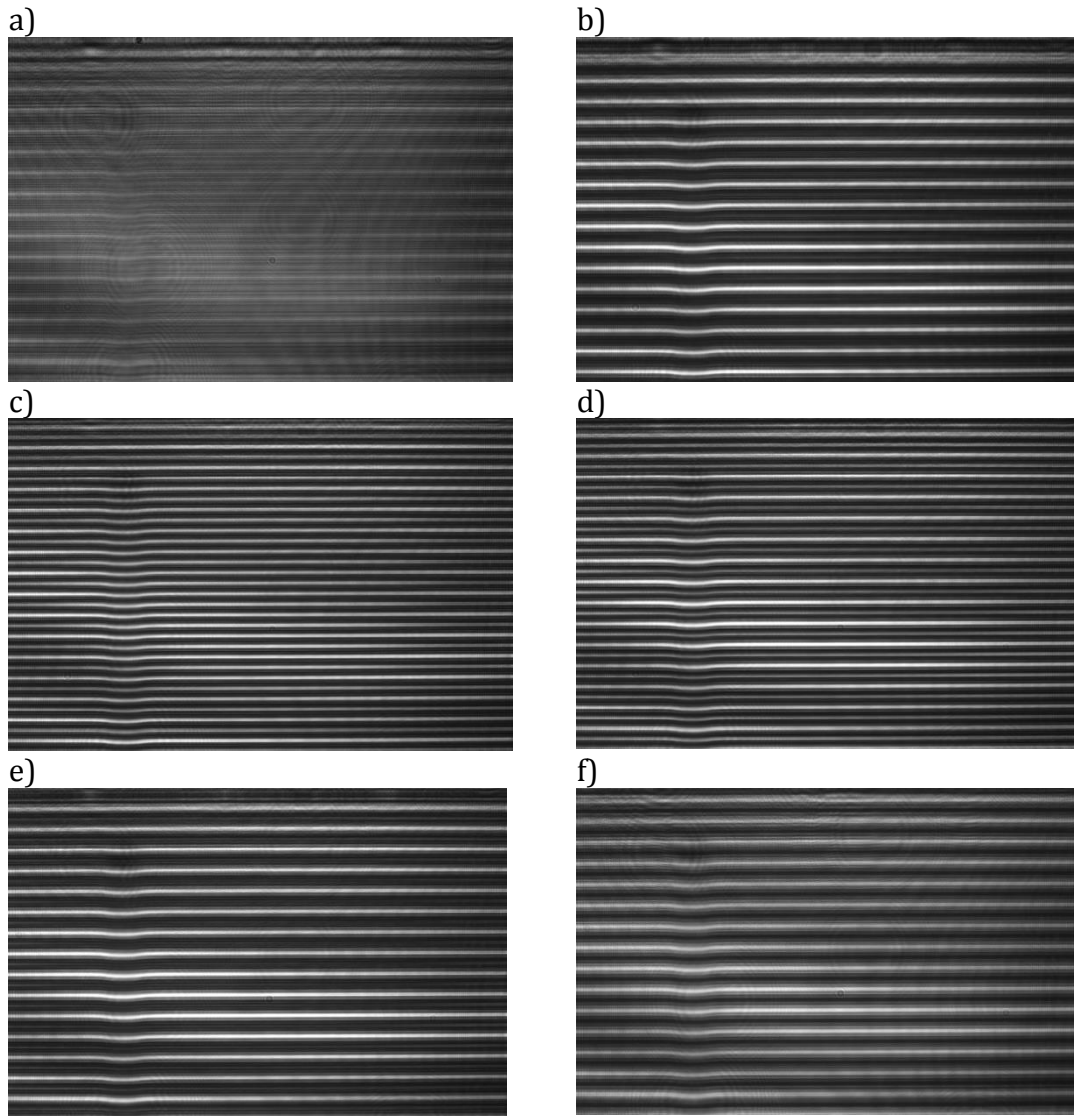


Figura 12. Imágenes de la distribución de intensidad de rejillas binarias de fase de transmitancia compleja con celdas básicas: a)255-0, b)255-45, c)255-90, d) 255-135, e) 255-180 y f) 255-225.

Las imágenes de distribución de intensidad no tienen alto contraste, para distinguir las coordenadas de máximos y mínimos se hicieron mascarillas como las de la figura [13] en base a la imagen de mayor contraste. Las máscaras definen las coordenadas de las franjas en las que se encuentran los máximos y los mínimos y se calcula el nivel de gris máximo promedio $\langle G_{max} \rangle$ y el nivel de gris mínimo promedio $\langle G_{min} \rangle$ para las franjas de cada distribución de intensidad.

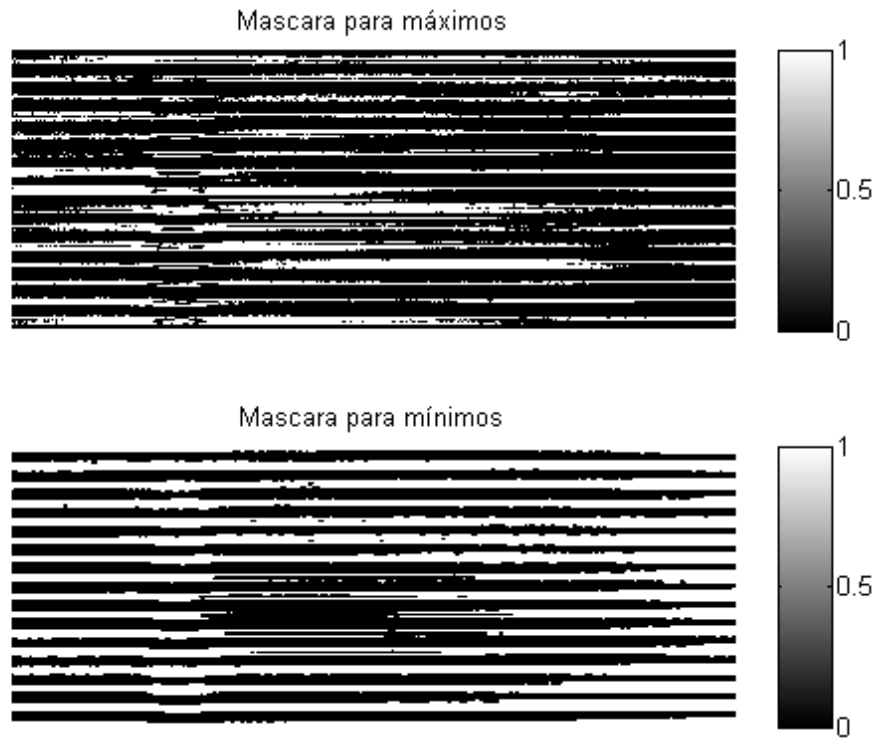


Figura 13. Máscaras utilizadas para seleccionar las coordenadas en las que se encontraban los máximos los mínimos de intensidad.

La visibilidad fue calculada utilizando la expresión de visibilidad para franjas de interferencia [2]:

$$V = \frac{\langle G_{max} \rangle - \langle G_{min} \rangle}{\langle G_{max} \rangle + \langle G_{min} \rangle}$$

Y finalmente mediante la expresión (3.1.2.1) se calcula el valor de fase que corresponde a cada nivel de gris utilizando ordenando los resultados según puntos característicos indicados en [1]. La figura [14] muestra la curva de caracterización de fase en función del nivel de gris correspondiente al SLM de la marca comercial Holoeye PLUTO NIR para $\lambda = 1064nm$.

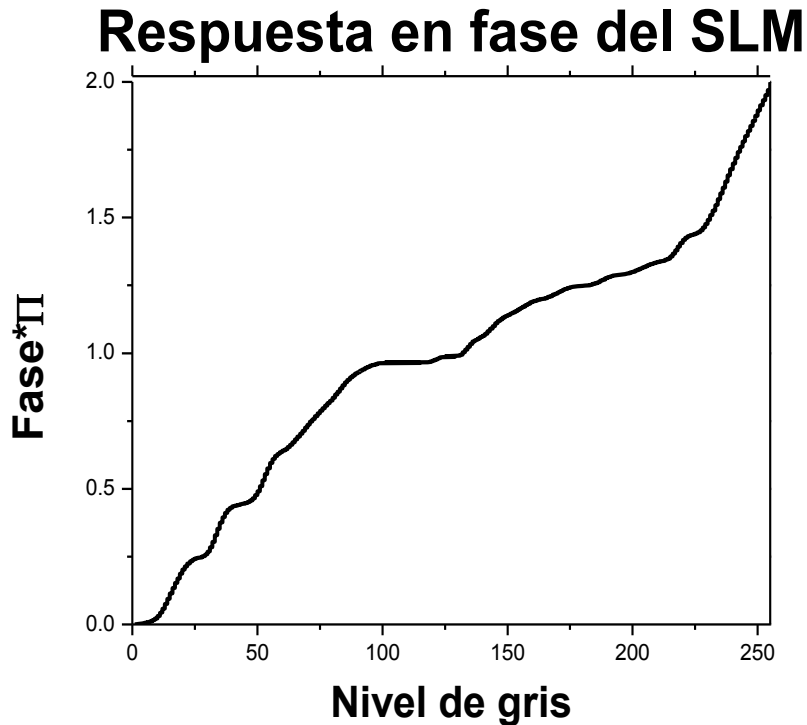


Figura 14. Nivel de fase que genera cada nivel de gris en el SLM PLUTO NIR con longitud de onda de 1064 nm

El rango de modulación del SLM se encuentra en el rango de 0 a 2π como se requiere para la implementación del algoritmo secuencial.

4.2. Medición del coeficiente de correlación como parámetro para determinar la estabilidad del sistema.

Antes de iniciar una prueba de enfoque a través de un medio esparcidor fue preciso monitorear que el coeficiente de correlación ρ se mantuviera constante durante un periodo largo de tiempo para asegurar que el sistema se encontrara estable durante el tiempo que se lleva a cabo la optimización.

El enfoque de luz a través del medio esparcidor con el algoritmo secuencial implementado en MATLAB requiere establecer un tiempo de iteración t_i , que corresponde al tiempo que toma evaluar los 10 valores de fase diferentes (uno a la

vez) para un solo segmento a optimizar, tomar una fotografía de la distribución de intensidad cada vez que se cambia un valor de fase, medir el valor de gris promedio en la región de interés y almacenar cada uno de estos valores y finalmente seleccionar y fijar el valor óptimo de fase y finalmente tomar una fotografía de la distribución de intensidad correspondiente dando un $t_i = 7s$.

Considerando el tiempo de iteración t_i , se monitoreó el coeficiente de correlación en intervalos grandes de tiempo, durante 30 y 120 minutos que corresponden al tiempo en que le toma al algoritmo secuencial paso a paso implementado en MATLAB realizar la optimización para 256 y 1024 segmentos respectivamente.

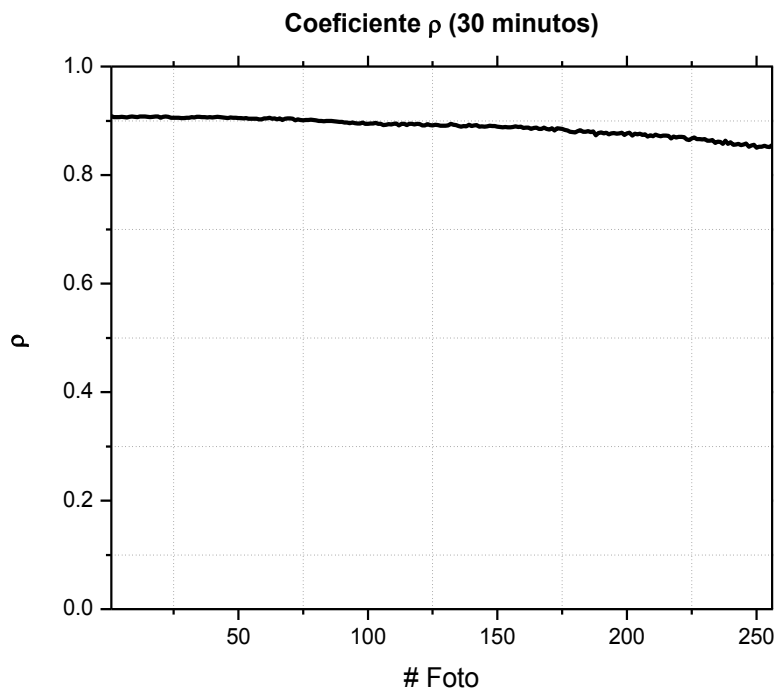


Figura 15. Coeficiente de correlación medido durante 30 minutos, tiempo aproximado de duración de la optimización de 256 segmentos.

Se utilizó un láser IR de $\lambda = 1064 \text{ nm}$ que puede emitir hasta 176 mW de potencia; sin embargo, el coeficiente de correlación de la figura [15] fue medido con solo 5.5 mW de potencia debido a que esta fue la potencia láser empleada en la mayoría de las optimizaciones. El coeficiente de correlación es susceptible a la potencia utilizada en su medición como se puede observar en la figura [16], en la prueba de 120 minutos el coeficiente de correlación inicial es más alto que el

coeficiente de correlación para la prueba de 30 minutos porque la potencia láser empleada en la segunda prueba fue 13 mW.

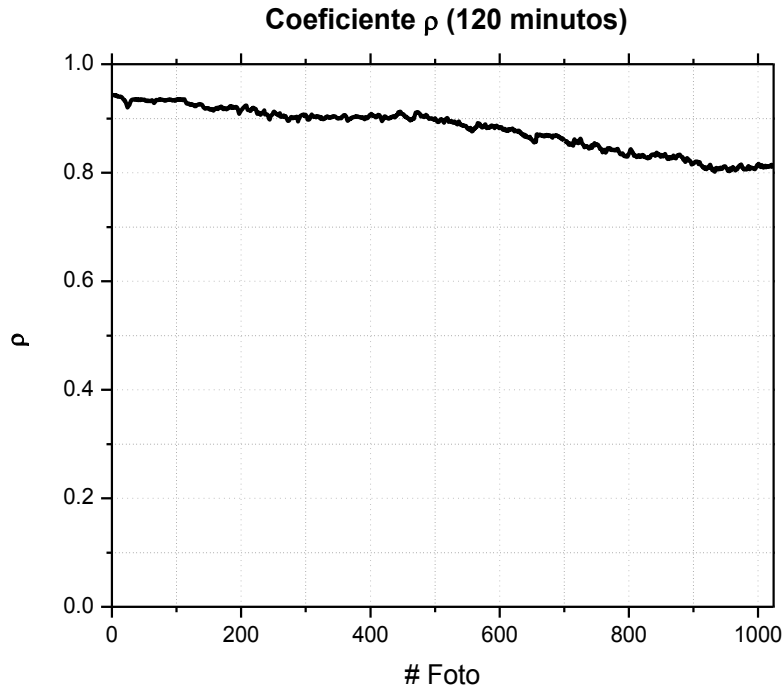


Figura 16. Coeficiente de correlación medido durante 120 minutos, tiempo aproximado de duración de la optimización de 1024 segmentos.

Ambas pruebas indican que el sistema es lo suficientemente estable y que el patrón de moteado no está cambiando en el tiempo de forma que afecte considerablemente las mediciones de correlación entre el estado inicial y otro estado arbitrario durante el tiempo de optimización. La prueba de 30 minutos indica que el coeficiente de correlación es prácticamente constante en ese intervalo de tiempo, lo que significa que el sistema es estable y además al ser un coeficiente de correlación alto se puede inferir que hay un gran parecido entre las imágenes correlacionadas. La prueba de 120 minutos mantiene un coeficiente de correlación alto en los primeros 60 minutos y posteriormente el coeficiente decrece lentamente indicando que el parecido entre las imágenes correlacionadas ha disminuido aunque no totalmente.

4.3. Implementación del algoritmo secuencial para enfoque a través de una muestra esparcidora para diferentes patrones.

La implementación del algoritmo secuencial en MATLAB permitió realizar una serie de pruebas en las cuales se optimizó la intensidad en diferentes regiones de interés. En las pruebas realizadas se definieron cinco regiones de interés particular:

- 1) Enfoque en región de interés de 1 píxel en el área central de la CCD.
- 2) Enfoque en región de interés de 3×3 píxeles en el área central de la CCD.
- 3) Enfoque en región de interés de 5×5 píxeles en el área central de la CCD.
- 4) Optimización de intensidad de una región de 41 píxeles dispuestos en línea horizontal en el área central de la CCD.
- 5) Enfoque en región de interés de 1 píxel fuera del área central de la CCD.

El interés de realizar estas pruebas es controlar la propagación de la luz a través del mismo medio esparcidor pero compensando diferentes desfases para optimizar diferentes distribuciones de intensidad.

4.3.1. Enfoque de luz a través de un medio esparcidor en 1 píxel en el área central de la CCD.

El programa de control seleccionó el píxel con menor intensidad correspondiente al píxel con el nivel de gris más bajo de la imagen de intensidad de una región de 10×10 píxeles en el área central de la CCD. Es importante definir la región de interés desde el inicio porque antes de empezar la optimización se debe medir la intensidad en esta región para calcular en base a este el factor de mejora. Se optimizaron 16, 64 y 256 segmentos y se calculó el factor de mejora para cada prueba.

La Figura [17] muestra las curvas de intensidad en el píxel de la región de interés en función del número de iteración para cada una de las pruebas con diferente número de segmentos. El nivel de gris inicial registrado para el píxel a optimizar fue $\Phi_0 = 1$, en base a esto se calcula el nivel de mejora correspondiente en cada iteración como lo muestra la figura [18].

Es preciso notar que entre menor sea el número de segmentos a optimizar mayor sea el tamaño del segmento. De la gráfica de la figura [17] se puede inferir que hay una dependencia del tamaño y número de segmentos utilizados en una prueba de enfoque. Al optimizar el nivel de fase en un segmento con un área mayor que un segmento con área menor, la intensidad crecerá más rápidamente; sin embargo, el nivel de intensidad alcanzado no será comparable con el alcanzado por segmentos más pequeños. En esta prueba se obtiene un nivel de gris máximo de 46 para una prueba de 16 segmentos, 90 para el caso de una prueba de 64 segmentos y finalmente para una prueba de 256 segmentos se obtiene un nivel de gris de 255 correspondiente al nivel de saturación para imágenes de 8 bits.

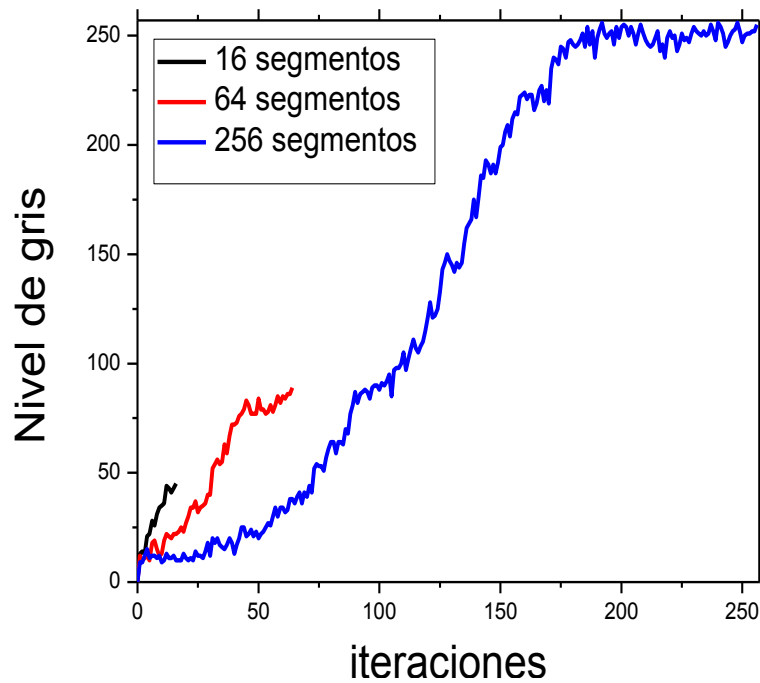


Figura 17. Gráfica de nivel de gris promedio en el píxel optimizado en función del número de iteración o número de segmentos correspondiente para cada prueba.

Es necesario resaltar que se requiere un número determinado de iteraciones para saturar una región específica, en este caso al optimizar la intensidad para un solo píxel dicha saturación se logra con aproximadamente 190 iteraciones correspondiente a un tiempo de aproximadamente 23 minutos.

Es importante tener un control de la radiación que está atravesando el medio en la región de interés es por ello que para cada prueba se mide el factor de mejora. Este factor indica el número de veces que aumenta la intensidad en el pixel de interés en base a la intensidad inicial registrada por el detector. Para el caso de enfoque de luz en un solo pixel el factor de mejora obtenido es de 255 veces debido a que el nivel de gris inicial fue $\Phi_0 = 1$.

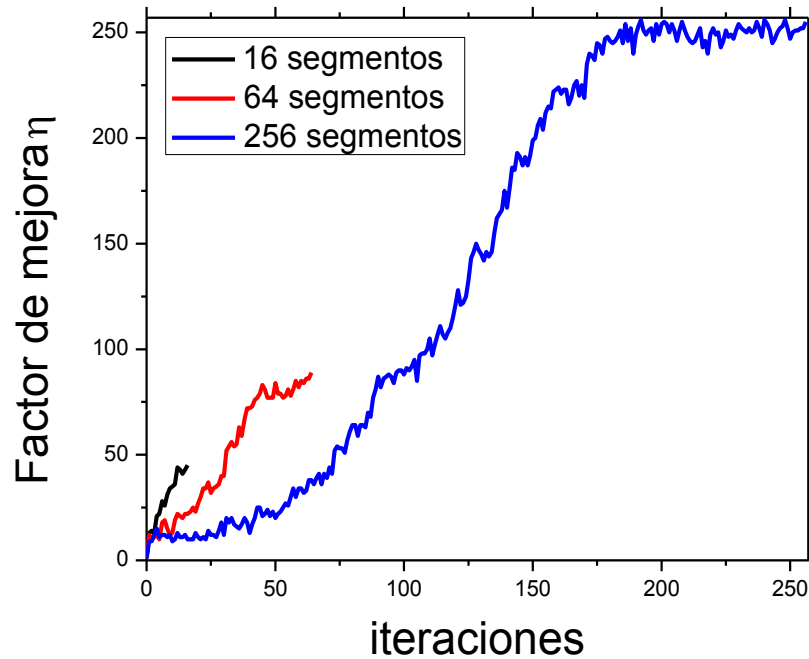
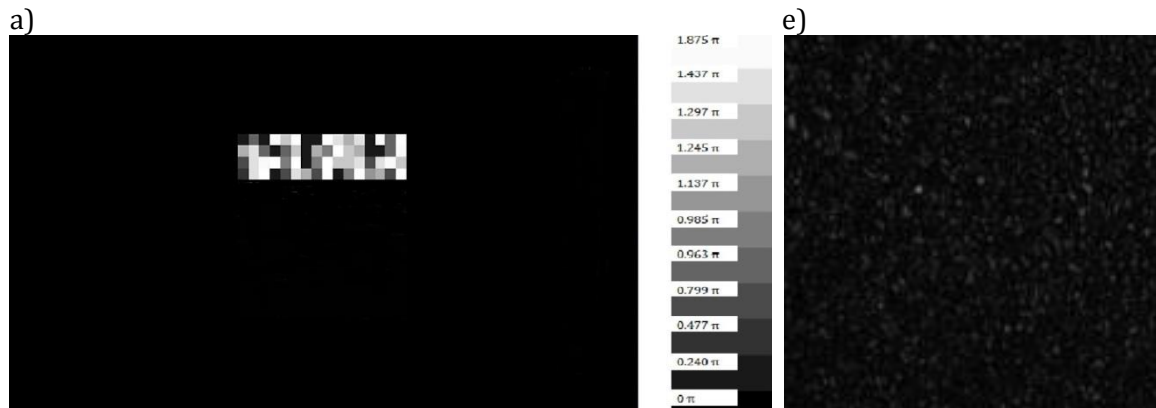


Figura 18. Factor de mejora en función del número de iteraciones para pruebas de 16, 64 y 256 segmentos, el nivel de mejora obtenido varía desde 46, 90 y 255 veces respectivamente.



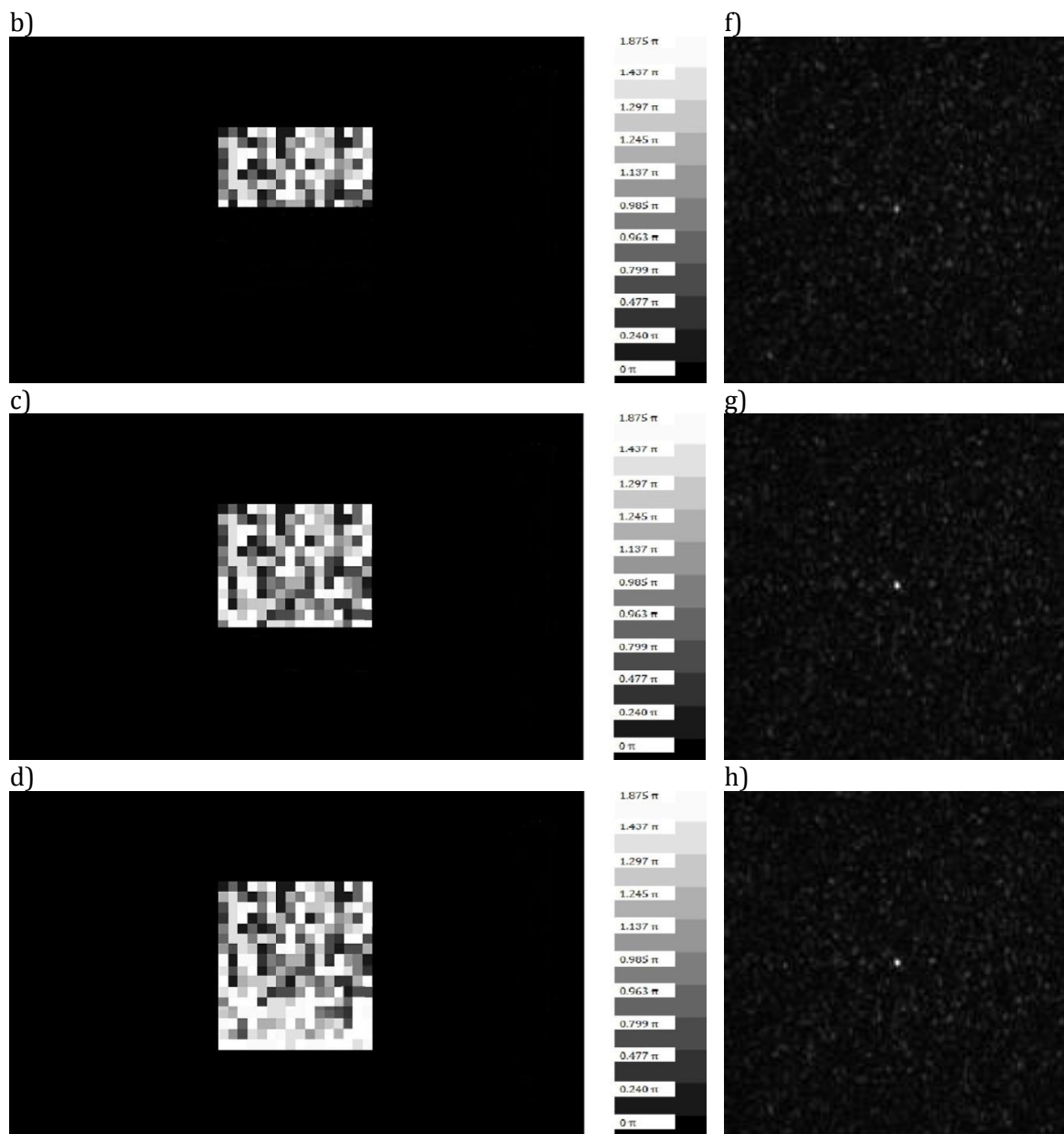


Figura 19. Enfoque a través de un medio esparcidor en región de interés en 1 píxel. Al fijar la fase a un segmento particular se toma una imagen correspondiente a la distribución de intensidad. a), b), c) y d) Imagen de fase enviada al modulador después de realizar la iteración número 64, 128, 192 y 256 respectivamente. e), f), g) y h) Distribución de intensidad registrada por la cámara después de la iteración 64, 128, 192 y 256 respectivamente.

La figura [19] muestra las imágenes de fase y su correspondiente distribución de intensidad para la prueba de 256 segmentos enfocando en un solo píxel.

Se observa en la figura anterior como antes de la iteración 64 aún no se distingue el pixel en el que se está enfocando, pero en la iteración número 128 ya es posible distinguir claramente el pixel optimizado del resto de las motas. En la iteración número 192 se observa con mayor claridad el pixel optimizado y finalmente en la iteración 256 el pixel completamente saturado.

Para esta prueba el nivel de fase que se repite con mayor frecuencia es el nivel de gris 250 como se muestra en la figura [20] que corresponde en nivel de fase a 1.875π . El histograma corresponde únicamente a la prueba de 256 segmentos mostrando para esa prueba en particular.

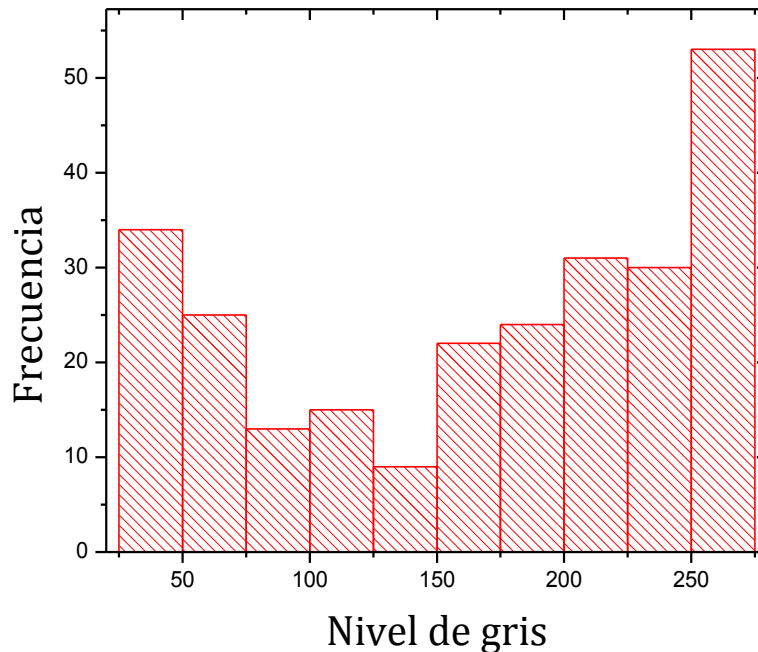


Figura 20. Histograma de frecuencias correspondiente a la prueba de enfoque de luz en 1 pixel en la región central. La fase predominante es 1.875π correspondiente al nivel de gris 250.

4.3.2. Enfoque de luz a través de una medio esparcidor en región de interés de 9 píxeles (3×3 píxeles).

La segunda prueba de implementación del algoritmo secuencial paso a paso consistió en aumentar el área en la que se optimiza la intensidad primero para una región de 9 píxeles (3×3) y después para un área de 25 píxeles (5×5) cuyos resultados se presentan en la sección 4.3.3. En este caso se realizaron cuatro optimizaciones cada una con diferente número de segmentos: 16, 64, 256 y 1024 segmentos. El nivel de gris inicial promedio en los 9 píxeles a optimizar fue $\langle \Phi_0 \rangle \approx 20$, este valor se calculó de acuerdo al nivel de gris inicial de cada uno de los píxeles que conforman la región de interés tomando el promedio.

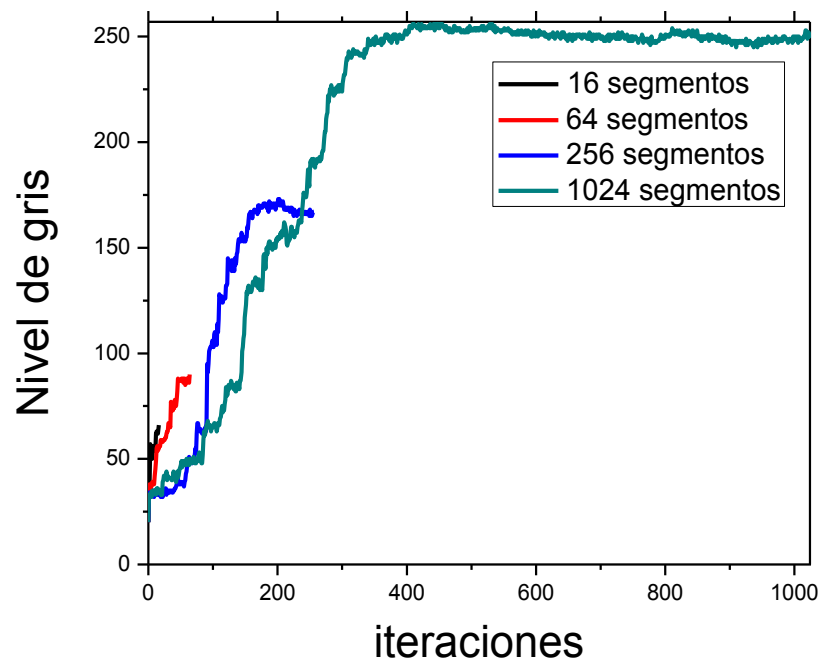


Figura 21. Nivel de gris promedio alcanzado para optimizaciones de 16, 64, 256 y 1024 segmentos en función del número de iteración para región de interés de 9 píxeles.

Al aumentar el área de la región de interés a optimizar fue preciso aumentar también el número de segmentos para lograr saturación. La medición de intensidad en la región de interés para las diferentes optimizaciones respecto al número de

iteración está registrada en la figura [21]. La saturación se logra con la optimización de 1024 segmentos de 16×16 pixeles alcanzado el nivel máximo de gris de 255. El resto de las optimizaciones de 16, 64 y 256 segmentos logran mejorar el nivel de gris promedio en cada iteración $\langle \Phi_i \rangle$; sin embargo, ninguna de estas pruebas logra saturar la región de interés. La optimización con 16 segmentos alcanza un nivel de gris máximo de aproximadamente 72, la optimización con 64 segmentos alcanza un nivel máximo de gris de aproximadamente 90 y finalmente la optimización de 256 segmentos alcanza un nivel máximo de gris de aproximadamente 170.

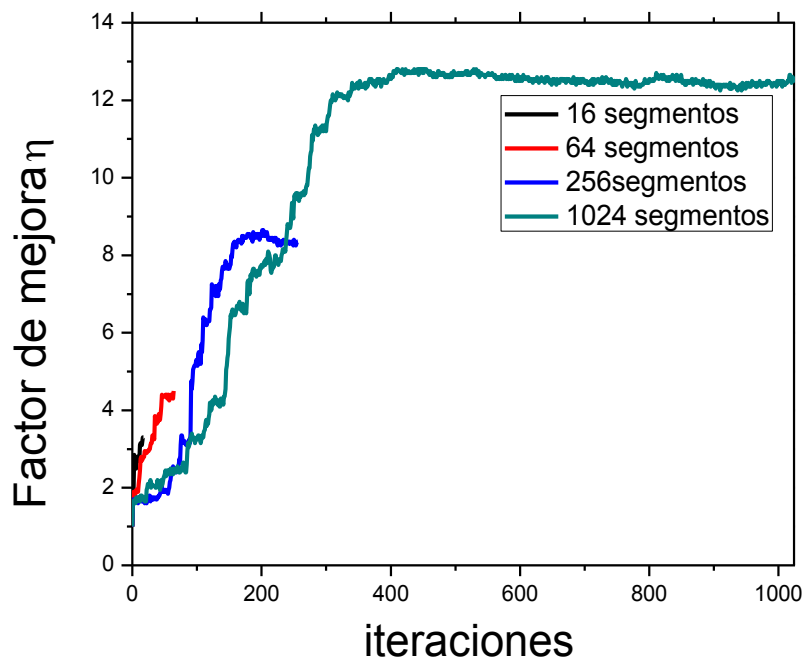
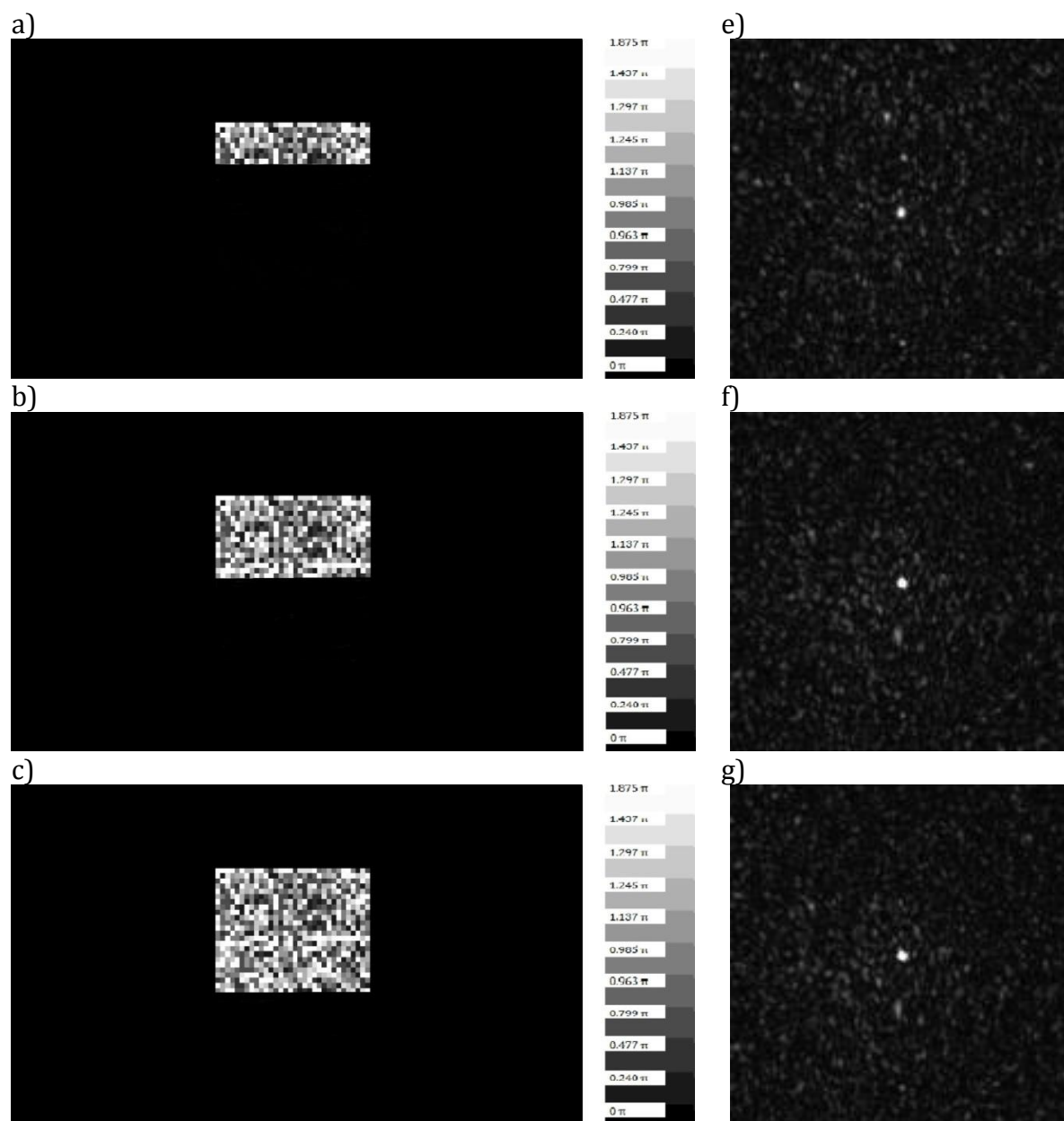


Figura 22. Factor de mejora alcanzado por optimización de 16, 64, 256 y 1024 segmentos para región de interés de 9 pixeles.

El factor de mejora registrado se calculó en base al nivel de gris promedio inicial $\langle \Phi_0 \rangle \approx 20$; para cuantificar el número de veces que aumentaba la intensidad en el detector después de cada iteración, la figura [22] muestra el factor de mejora para la optimización de 16, 64, 256 y 1024 segmentos. El factor de mejora máximo fue de aproximadamente 13 veces.

Después de 400 iteraciones correspondiente a un tiempo de aproximadamente 48 minutos se alcanza el nivel de saturación en la región de interés, después de las 400

iteraciones la intensidad permanece casi constante. La Figura [23] ilustra las imágenes de fase desplegadas en el modulador para 256, 512, 768 y 1024 iteraciones y su respectiva distribución de intensidad registrada por el detector.



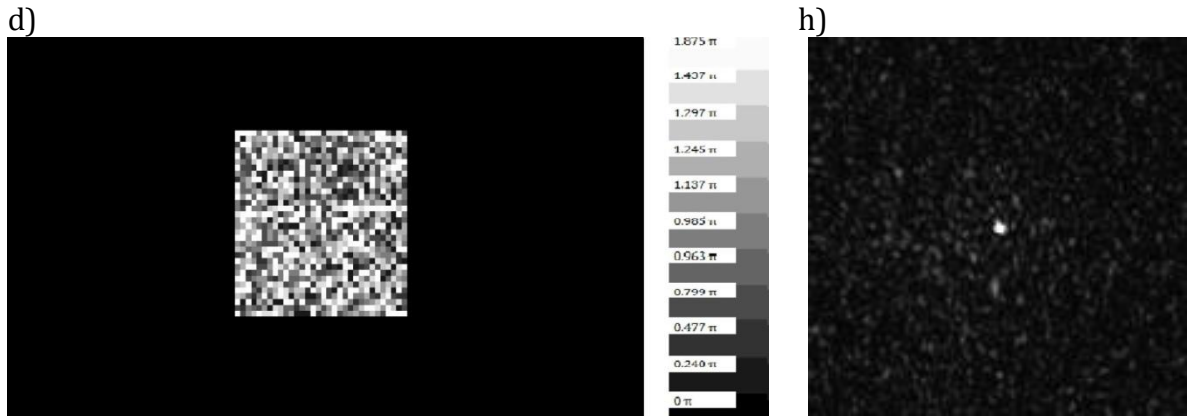


Figura 23. Las imágenes a), b), c) y d) muestran las imágenes de fase para optimización de 256, 512, 768 y 1024 segmentos respectivamente. En los apartados e), f), g) y h) se encuentran sus correspondientes distribuciones de intensidad.

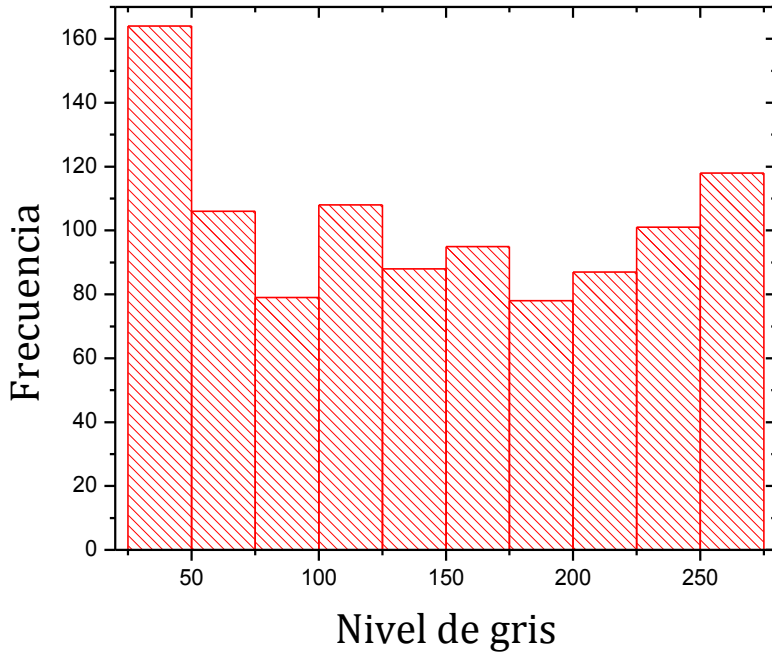


Figura 24. Histograma de frecuencias de nivel de gris para optimización de 1024 segmentos en región de interés de 9 píxeles en el área central de la CCD.

Para la optimización de 1024 segmentos en una región de interés de 9 píxeles la fase con mayor recurrencia es la correspondiente a un nivel de gris de 25 (0.24π)

repitiéndose más de 160 ocasiones. La figura [24] cuantifica la frecuencia para cada nivel de gris correspondiente a la fase óptima para cada segmento para.

4.3.3. Enfoque de luz a través de un medio esparcidor en región de interés de 25 píxeles (5×5 píxeles) en el área central de la CCD.

Aumentando el área de la región de interés, definiendo un área de 5×5 píxeles sobre la región central del detector se realizó optimización con 16, 64, 256 y 1024 segmentos. La potencia utilizada en estas pruebas fue de 5.5 mW . La figura [25] muestra las curvas del nivel de gris alcanzado en la región de interés para las cuatro optimizaciones realizadas, logrando para la optimización con 16 segmentos un máximo de nivel de gris de aproximadamente 55, con 64 segmentos se logra un nivel máximo de gris de aproximadamente 92, con 256 segmentos se logra un máximo de nivel de gris de 170 y finalmente con optimización de 1024 segmentos se logra un nivel máximo de gris de aproximadamente 243.

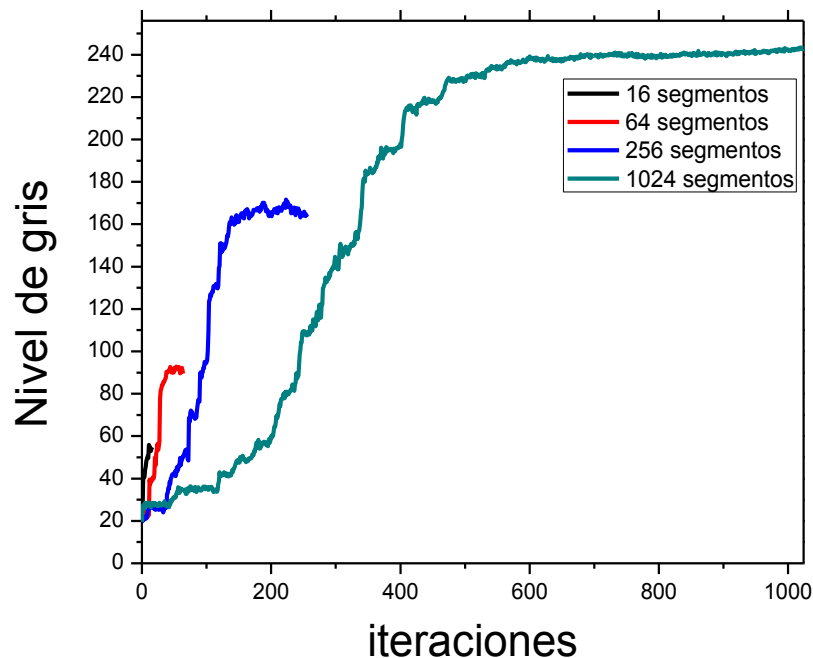


Figura 25. Nivel de gris promedio con optimización con 16, 64, 256 y 1024 segmentos para región de interés de 25 píxeles en el área central de la CCD.

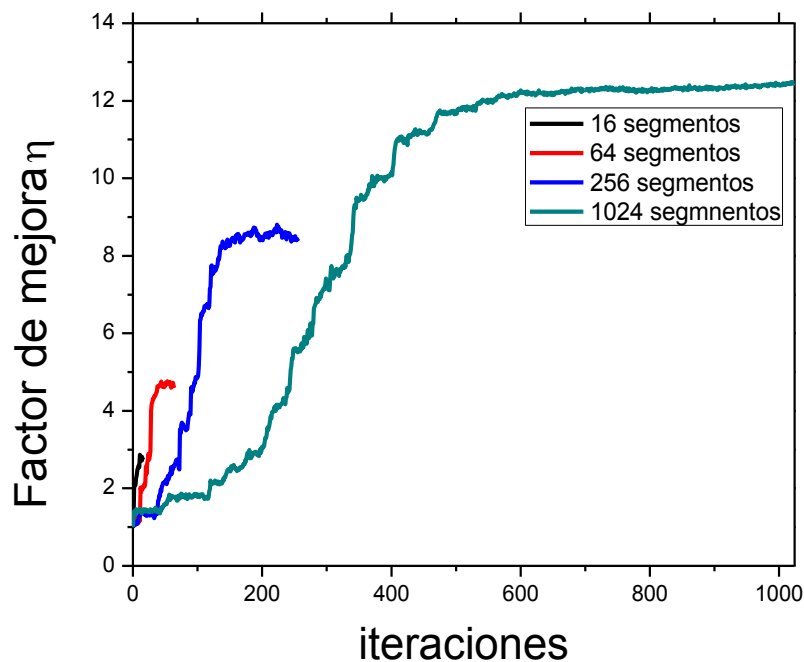
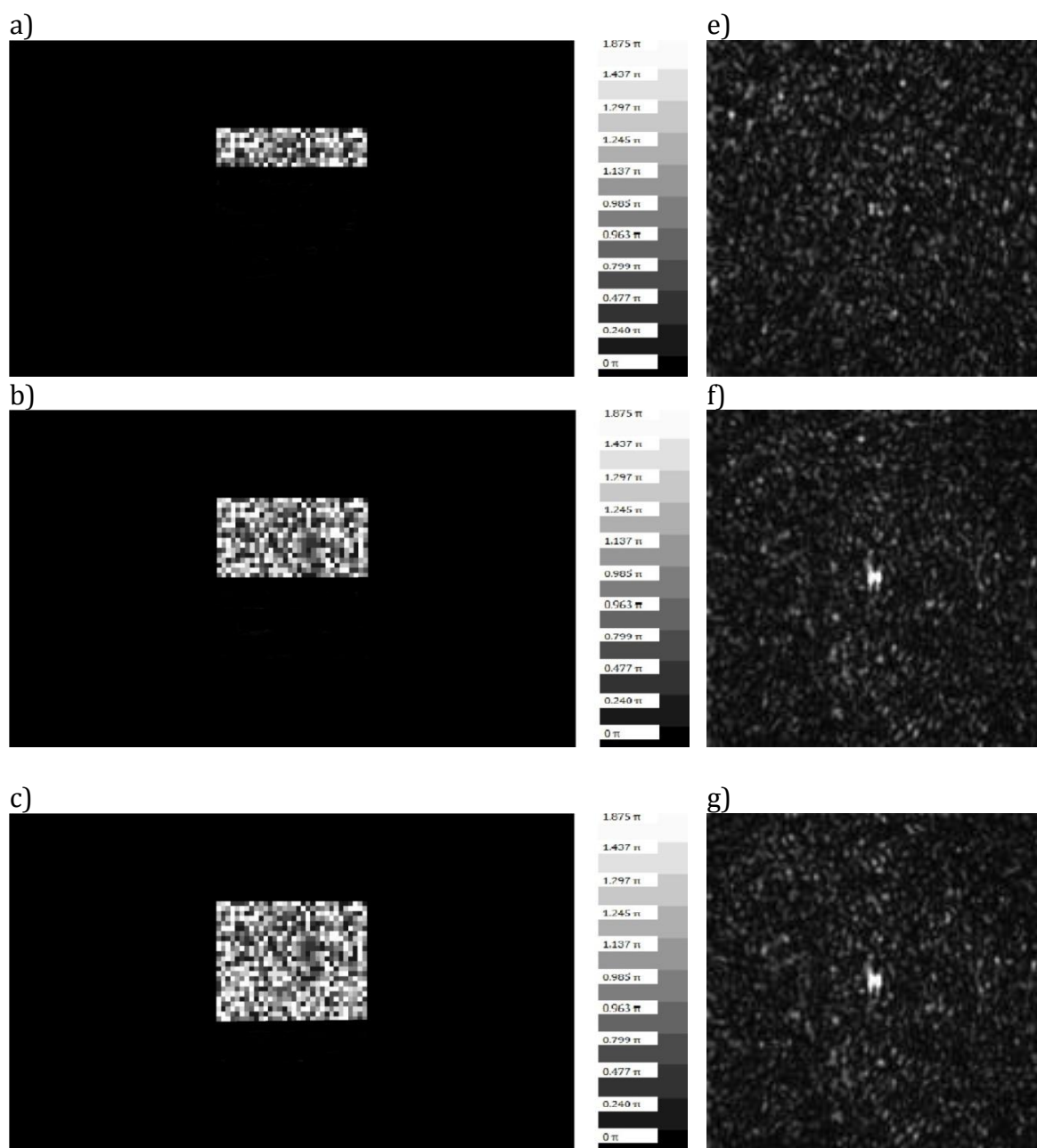


Figura 26. Factor de mejora para optimización con 16, 64, 256 y 1024 segmentos en una región de interés de 25 píxeles en el área central de la CCD.

Aunque no se logra saturar la región de interés por completo, con la optimización de 1024 segmentos se alcanza un nivel de gris muy cercano al nivel de saturación. El nivel de mejora se midió en función del nivel de gris inicial promedio $\langle \Phi_0 \rangle = 19.5$, la figura [26] muestra las curvas del factor de mejora obtenido para cada una de las optimizaciones utilizadas obteniendo un factor de mejora máximo de 12.5 veces en comparación con el nivel de gris inicial promedio cuando se optimiza la intensidad en la región de interés con 1024 segmentos.

El factor de mejora alcanzado con optimización de 1024 segmentos fue muy similar tanto para la región de 3×3 píxeles como para la región de 5×5 píxeles, sin embargo; el tiempo en que se lleva a cabo la saturación para la región de 3×3 píxeles (48 minutos) es menor que el tiempo en que se logra el nivel de gris máximo para el caso la optimización de la región de 5×5 píxeles (84 minutos) sin lograr saturación sobre toda la región de interés.

La figura [27] muestra gráficamente la evolución de la optimización con 1024 segmentos, en la columna izquierda se muestran las imágenes de fase enviadas al modulador espacial de luz con las fases óptimas para lograr enfoque en la región de interés en cuatro diferentes tiempos de la optimización, mientras que en la columna derecha se muestra la evolución de la distribución de intensidad que genera cada una de las imágenes de fase de la columna izquierda respectivamente. Los momentos de la optimización mostrados corresponden a 256, 512, 768 y 1024 segmentos optimizados.



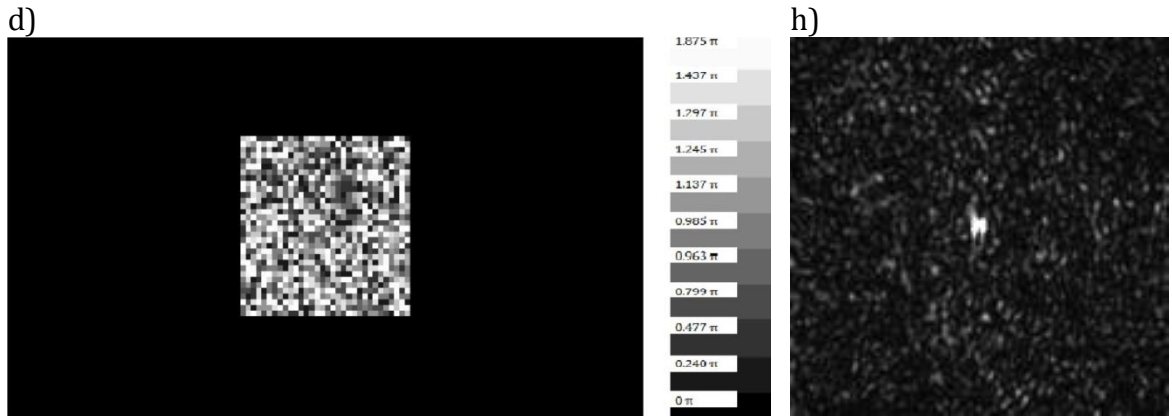


Figura 27. Evolución de optimización de 1024 segmentos en una región de 5x5 píxeles sobre la región central del detector. Las imágenes a), b), c) y d) muestran las imágenes de fase óptimas enviadas al modulador para lograr enfoque. Las imágenes e), f), g) y h) muestran las distribuciones de intensidad correspondiente a la imagen de fase de la columna izquierda para 256, 512, 768 y 1024 segmentos.

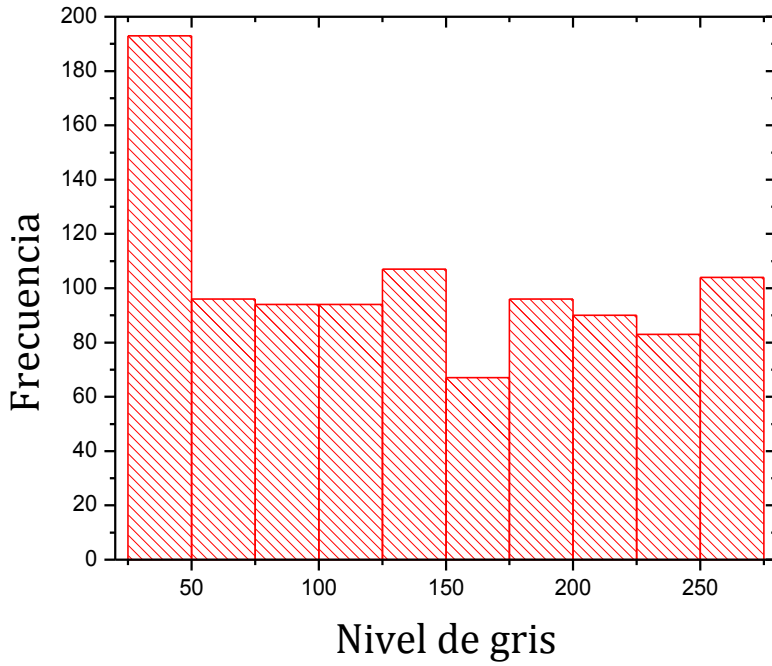


Figura 28. Histograma de frecuencia de fases para optimización de 1024 segmentos sobre una región de interés de 5x5 píxeles.

De la columna derecha de la figura [27] se puede observar como la distribución de intensidad cambia en la región central, el cambio no es apreciable después de optimizar 256 segmentos pero sí después de optimizar 512 segmentos, mientras que para 768 y 1024 segmentos optimizados la región de interés empieza a saturarse en algunos pixeles que definen los bordes de la región pero sin saturar el centro por completo. De acuerdo al histograma de la figura [28] la fase con mayor frecuencia fue la correspondiente al nivel de gris 25 o 0.240π en fase.

Para tener un parámetro de la convergencia de luz alrededor del área de interés sobre el área central de la CCD se obtuvieron los perfiles de intensidad para 1, 3 y 5 pixeles como se presentan en la Figura [29]. Para cada optimización se obtiene un FWHM (Full Width at Half Maximum) de 2.12, 4.70 y 6.28 pixeles, con lo que se obtiene una desviación de aproximadamente un pixel del área de interés.

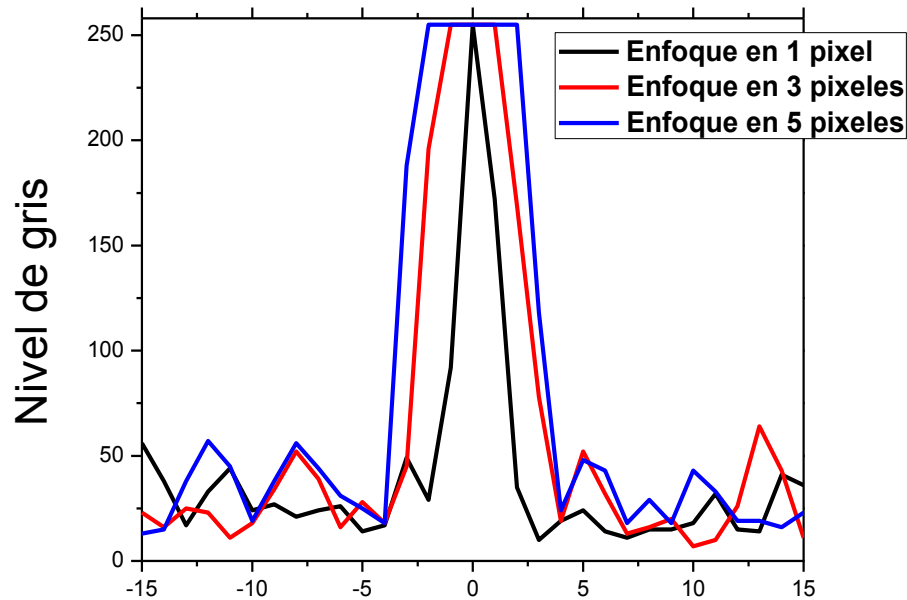


Figura 29. Perfiles de intensidad en nivel de gris para 1, 3 y 5 píxeles en el área central de la CCD.

4.3.4. Optimización de intensidad de luz a través de un medio esparcidor en región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD.

De la optimización de 1024 píxeles para regiones de interés de 3×3 y 5×5 se puede inferir que entre mayor sea la región de interés requerirá un mayor número de segmentos y más tiempo de procesamiento cuando se utiliza la misma muestra y la misma potencia del láser, debido a estos factores se decidió aumentar la potencia del láser a 13 mW en lugar de aumentar el número de segmentos ya que esto supondría tiempos de optimización demasiado largos. La figura [30] muestra el nivel de gris alcanzado en función de la optimización de cada uno de los segmentos de fase, el nivel de gris inicial promedio fue $\langle \Phi_0 \rangle = 51$ aproximadamente y alcanza un nivel máximo de gris promedio de aproximadamente $\langle \Phi_{1024} \rangle = 216$.

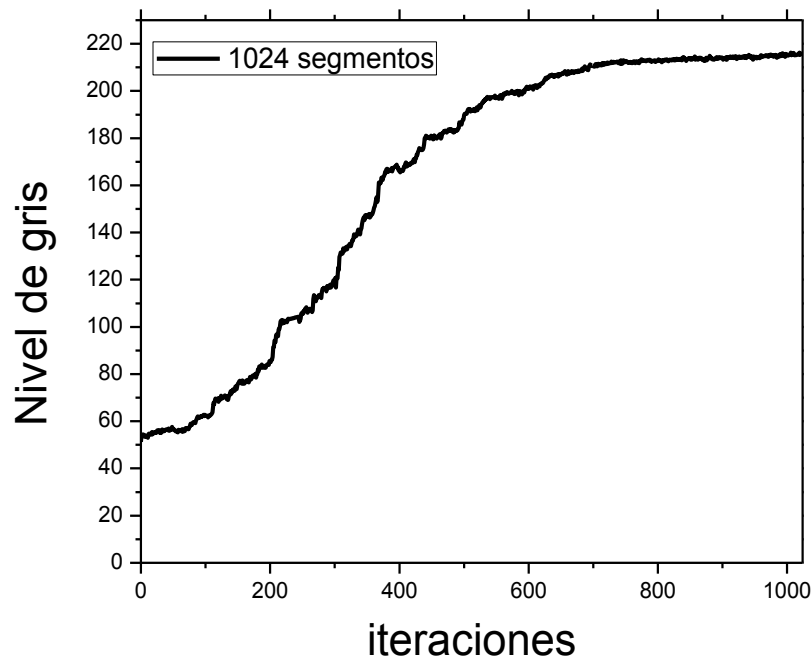


Figura 30. Nivel de gris promedio en la región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD.

A partir de la iteración 700 la intensidad crece muy lentamente debido a que la optimización de cada segmento repercutió en mayor medida sobre puntos particulares y no de manera homogénea sobre toda la región de interés.

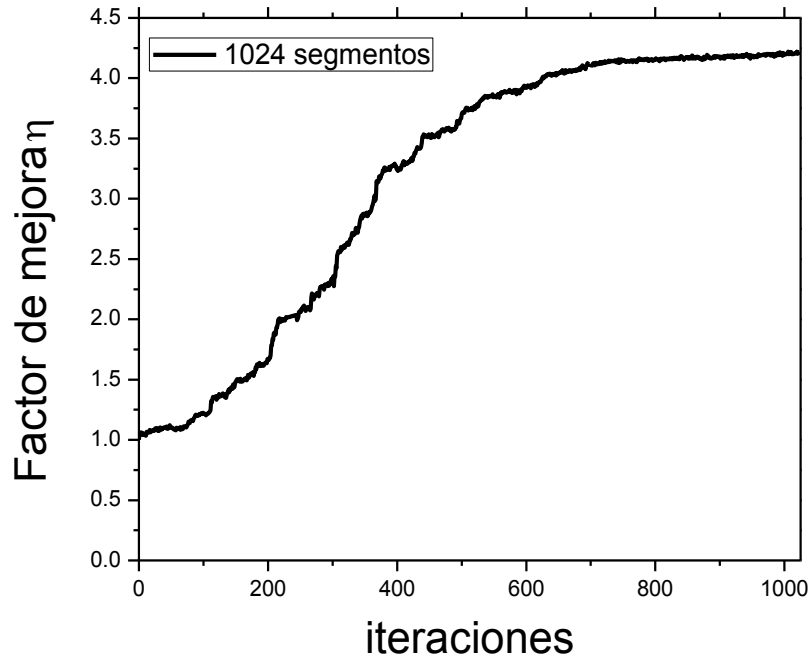
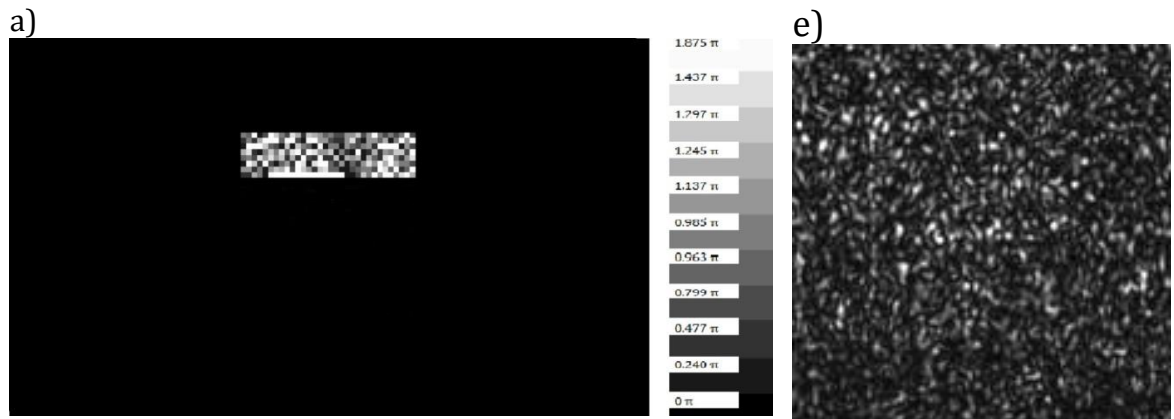


Figura 31. Factor de mejora para optimización de 1024 segmentos de fase en una región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD.

El nivel de mejora obtenido con esta optimización fue 4.2 veces la intensidad inicial promedio $\langle \Phi_0 \rangle$ según la figura [31]. La figura [32] muestra gráficamente la evolución de la distribución de intensidad después de optimizar 256, 512, 768 y 1024 segmentos, en la columna derecha se encuentran la distribución de intensidad correspondiente a la imagen de fase de la columna izquierda.



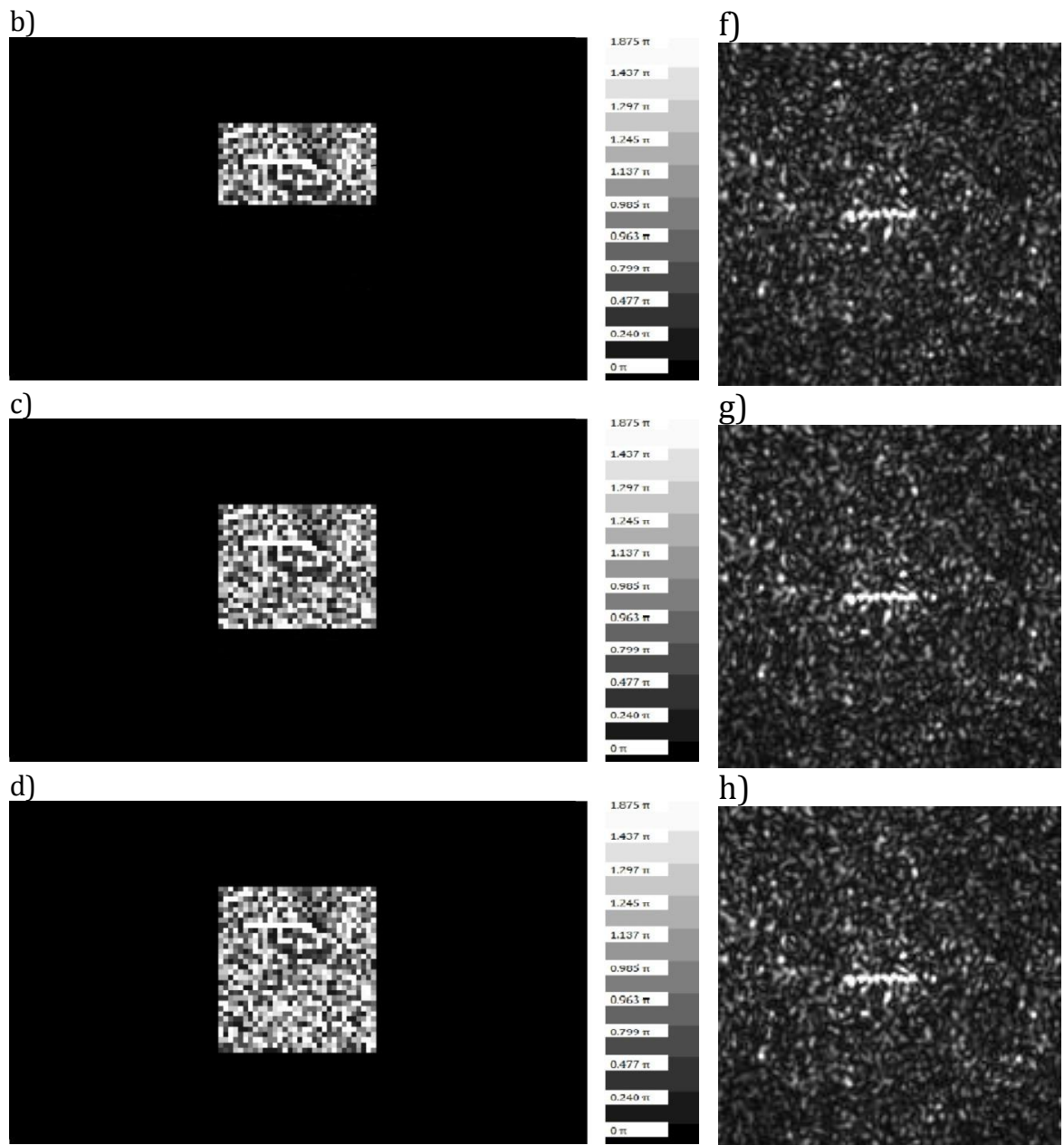


Figura 32. Evolución de la optimización de 1024 segmentos en región de interés de 41 píxeles. Las imágenes a), b), c) y d) muestran la imagen de fase óptima para las iteraciones 256, 512, 768 y 1024; mientras que las imágenes e), f), g) y h) muestran la distribución de intensidad respectivamente.

El nivel de fase más recurrente en la optimización de 1024 segmentos para una región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD fue de 0.240π correspondiente al nivel de gris 25 según el histograma de la figura [33].

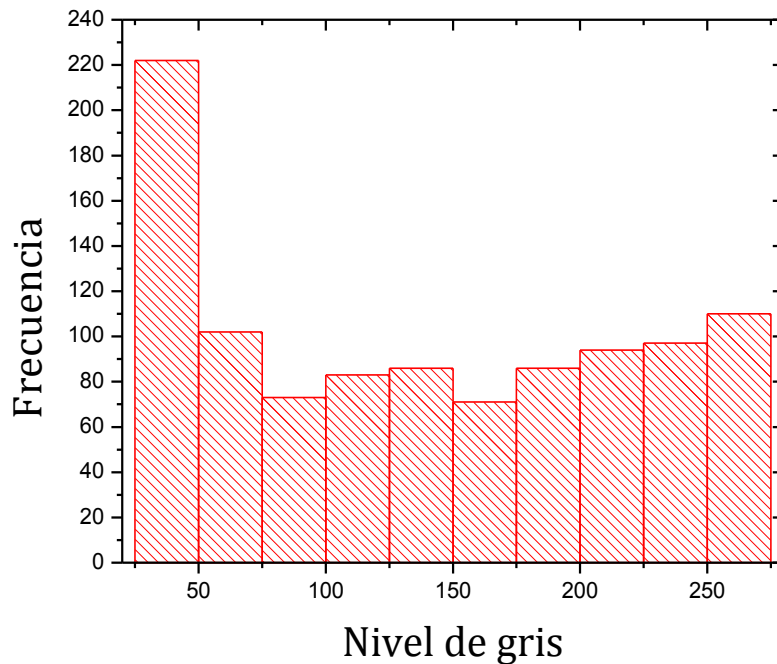


Figura 33. Histograma de frecuencias de fase con optimización de 1024 píxeles en región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD.

4.3.5. Enfoque de luz a través de un medio esparcidor en región de interés de 1 píxel fuera de la región central de la CCD.

La región de modulación se encuentra en la región central del modulador, al cambiar la posición de la región de interés por una que se encuentre fuera del área central del detector y mantener el área de modulación constante se observa de la figura [34] que algunos segmentos influirán en mayor o menor medida en la optimización.

Se realizó optimización con 256 y 1024 segmentos definiendo la región de interés de 1 píxel en la coordenada (463, 665) fuera de la región central del detector, recordando que esta se encuentra en la vecindad de 100 píxeles que rodean la coordenada (600, 800).

Como se puede observar en la figura [34], los primeros segmentos contribuyen de manera mínima a mejorar la intensidad en la región de interés, debido a que la luz que proviene de esos ángulos forma ángulos mayores respecto al eje óptico y por lo tanto la contribución a la optimización será menor en comparación con la luz provenientes de segmentos que formen ángulos menores respecto al eje óptico.

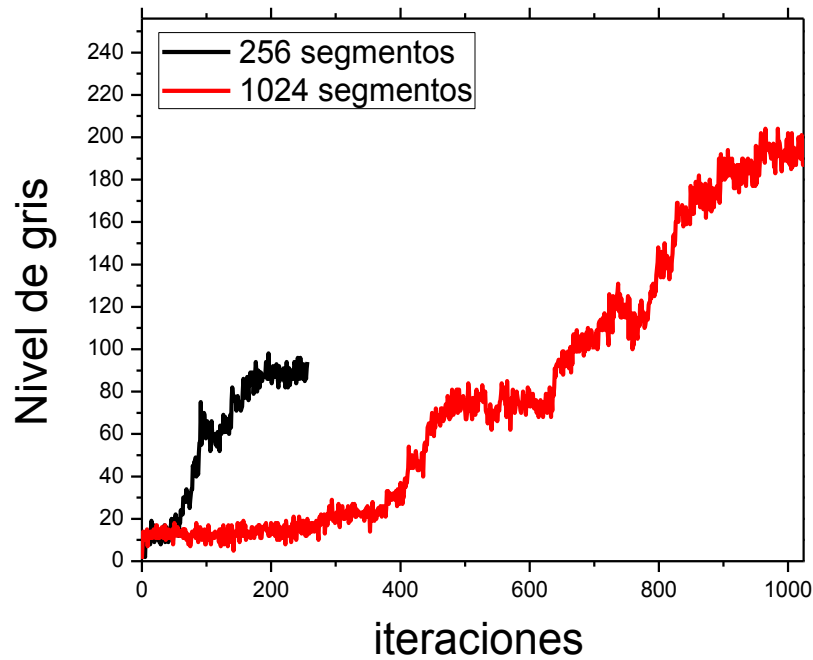


Figura 34. Nivel de gris alcanzado en función del número de iteración para optimización de 256 y 1024 segmentos en región de interés de 1 pixel fuera de la región central de la CCD.

La optimización con 1024 segmentos permitió obtener un factor de mejora máximo de aproximadamente 193 veces considerando un nivel de gris inicial $\Phi_0 = 1$, mientras que con optimización de 256 segmentos se obtiene un factor de mejora de aproximadamente 94 veces como se muestra en la figura [35]. Las optimizaciones se realizaron utilizando potencia láser de 5.5 mW, la misma potencia utilizada en las corridas típicas mencionadas en las secciones 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3; sin embargo, como se observa en la figura [36] en este caso no se alcanza a saturar completamente la región de interés.

En la imagen [4.3.5.3] e) y f) corresponden a la optimización de 256 y 512 segmentos respectivamente, en estas no es posible distinguir el pixel seleccionado a maximizar su intensidad. Las imágenes [4.3.5.3] g) y h) muestran distribución de intensidad después de optimizar 768 y 1024 segmentos respectivamente; en la parte superior izquierda se observa con mayor claridad el pixel seleccionado como región de interés.

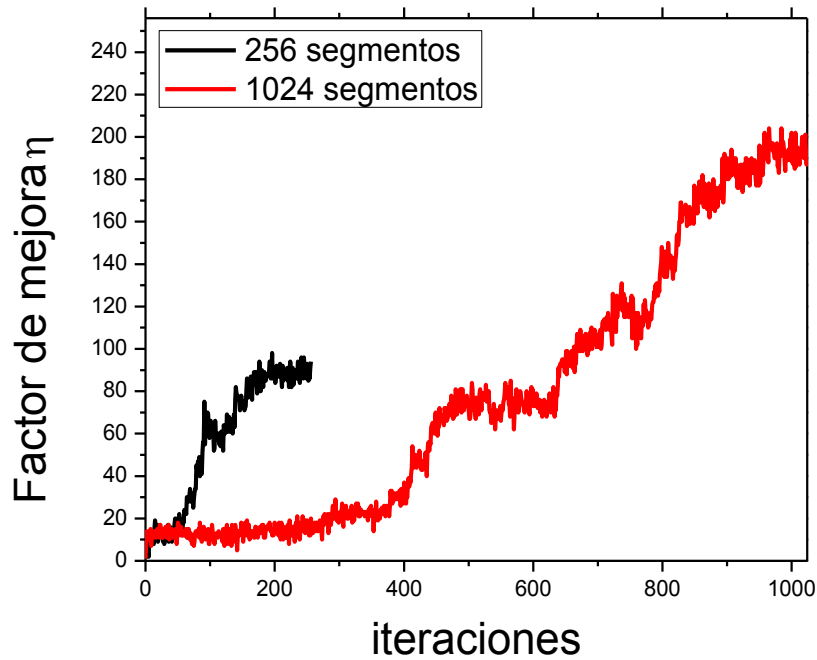
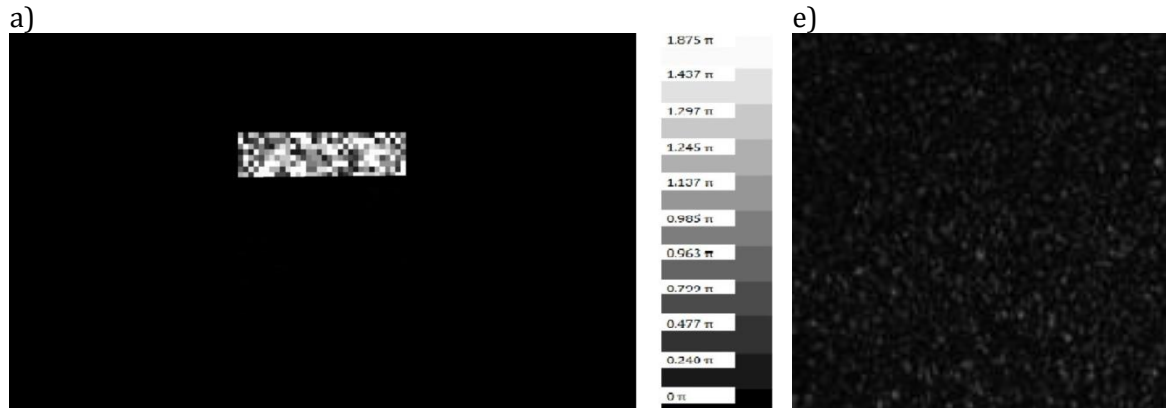


Figura 35. Factor de mejora para optimización de 256 y 1024 pixeles en región de interés de 1 pixel fuera de la región central de la CCD.



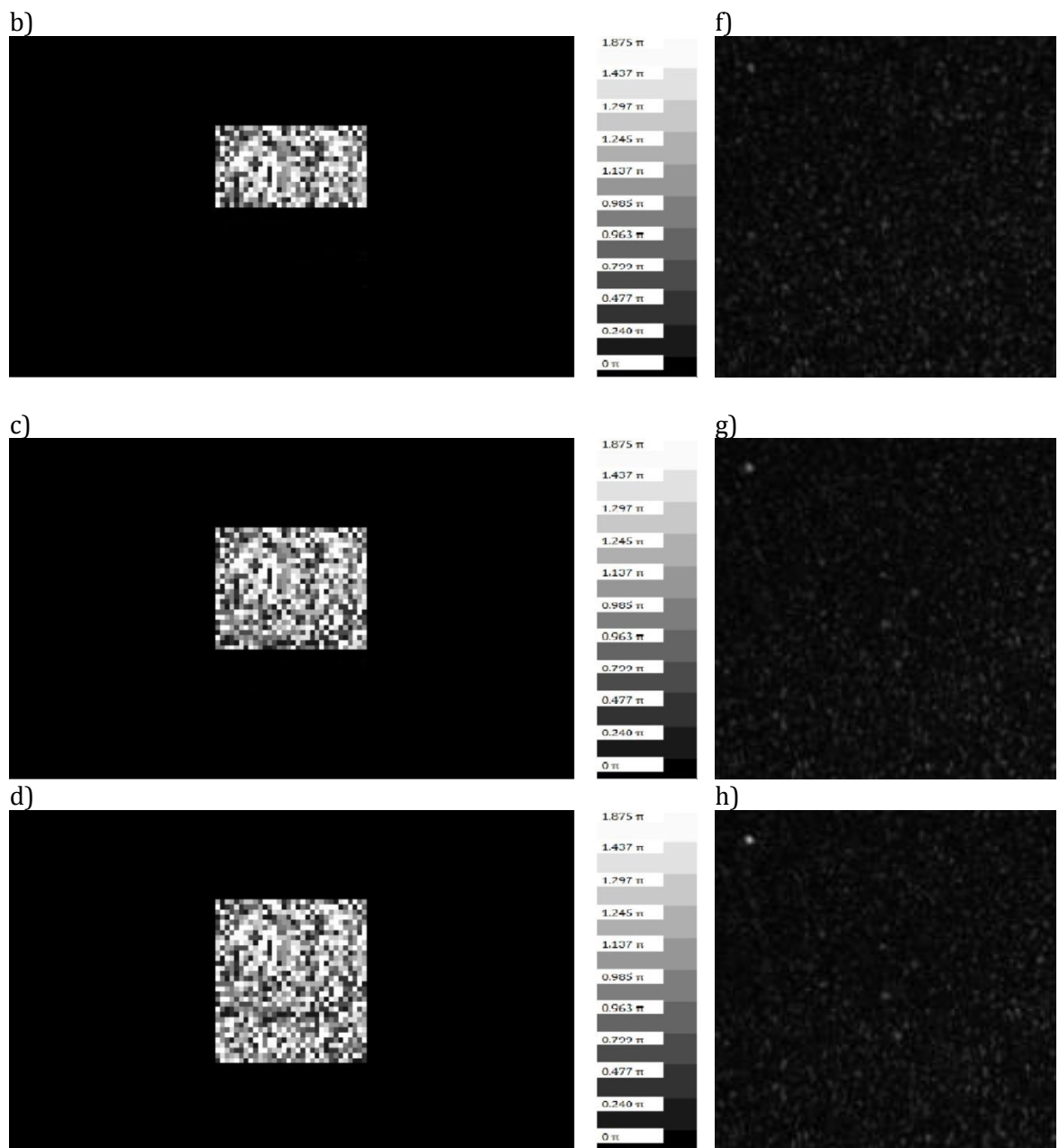


Figura 36. Optimización de 1024 segmentos en región de interés de 1 pixel fuera de la región central. Donde a), b), c) y d) muestran las imágenes de fase de 256, 512, 768 y 1024 iteraciones con sus respectivas imágenes de distribución de intensidad e), f), g) y h).

La figura [37] muestra que para la optimización de 1024 segmentos el nivel de fase más recurrente fue de 0.240π correspondiente al nivel de gris 25.

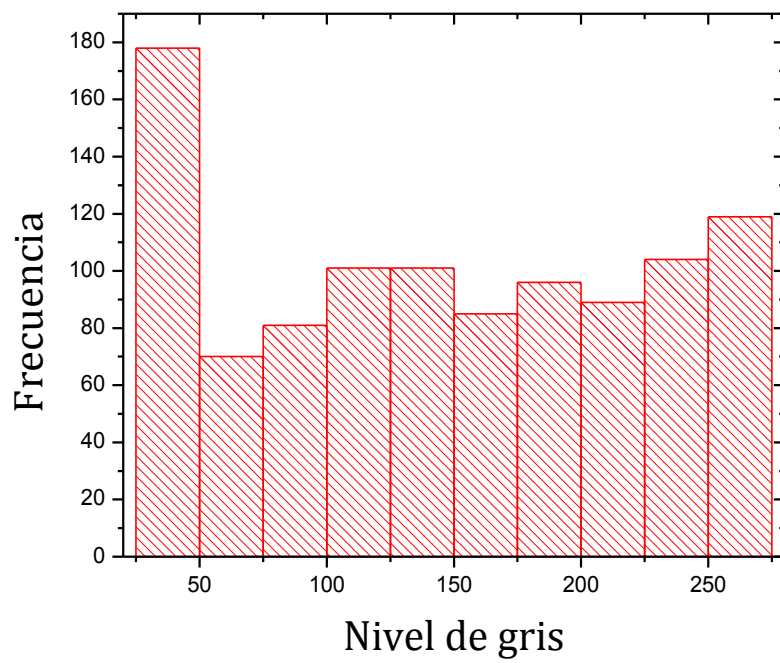


Figura 37. Histograma de frecuencia de nivel de fase para optimización de 1024 segmentos para un pixel fuera del área central de la CCD.

Referencias

- [1] Vázquez Olivos, María de los Ángeles Josefina. *Caracterización de una pantalla de cristal líquido nemático como modulador de fase*. Tesis Mag. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica Y Electrónica. 165 p.
- [2] Hetch, Eugene. *Óptica*. Tercera edición. Madrid: Addison Wesley. (2000). Cap. 16

Capítulo 5. Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se ha logrado implementar satisfactoriamente de forma experimental un algoritmo de optimización secuencial para lograr enfoque de luz coherente a través de un medio esparcidor estático. Con este fin se llevaron a cabo tres tareas importantes: 1) el análisis y entendimiento de los conceptos teóricos involucrados en el modelo que describe la propagación de luz coherente a través de un medio esparcidor estático, además el análisis del modelo teórico que permite enfoque de luz a través de un medio esparcidor, 2) la caracterización del modulador espacial de luz, y, 3) el acoplamiento del arreglo experimental con el programa de control.

El modelo utilizado en este trabajo para describir la propagación de la luz a través de un medio esparcidor estático está basado en la ecuación de difusión. A diferencia de trabajos previos [1 y 5], en esta investigación se tomó en consideración la absorción del medio. Esto permitió tener una solución que se aproximara a las condiciones reales del problema presentado en este trabajo.

La caracterización del modulador espacial de luz fue de suma importancia ya que el algoritmo secuencial basa su funcionamiento en el desempeño de dicho dispositivo. Para ello se implementó un software en MATLAB capaz de analizar imágenes de la distribución de intensidad generadas por rejillas de transmitancia compleja de acuerdo a [4] y obtener la curva característica de modulación de fase para un modulador espacial de luz.

Todo el desarrollo de software implementado al arreglo experimental fue realizado en MATLAB y tuvo éxito en su implementación para muestras estáticas. Consiguiendo con esto un sistema semiautomatizado que facilita llevar a cabo las pruebas experimentales. Sin embargo, los tiempos de iteración aún son relativamente altos comparando con los tiempos que reportan [1 y 2]. En el trabajo a futuro se contempla mejorar los tiempos de iteración para lograr que las pruebas de

optimización sean mucho más rápidas. De esta manera, se abriría la posibilidad de generar enfoque a través de medios esparcidos dinámicos y con esto la posibilidad de implementar esta técnica en tejido biológico.

El factor de mejora cuantifica la eficiencia de los algoritmos para lograr enfoque a través de un medio esparcido estático. Los factores de mejora alcanzados en las pruebas reportadas en este trabajo dependieron tanto del número de segmentos de fase optimizados como de la región de interés sobre el detector. El nivel máximo de mejora alcanzado fue de 256 veces para una región de 1 pixel en la región central de la CCD.

Las pruebas experimentales realizadas para recuperar el foco fueron exitosas tanto para regiones de interés pequeñas como para regiones de interés con un mayor número de pixeles. En la mayoría de los casos se alcanza la saturación de los pixeles en la región de interés. El experimento que consiste en poder optimizar la intensidad para un patrón como una línea nos acerca a los resultados obtenidos en [3]. En este trabajo logran visualizar objetos detrás de un medio esparcido, aunque el criterio de optimización y la configuración experimental pueden ser diferentes, la técnica aplicada es la misma, se controla la propagación de la luz a través de un medio esparcido. Este factor brinda la posibilidad de poder aplicar esta técnica en el área médica para la visualización de vasos sanguíneos a través piel o diente.

Los histogramas de fase presentan una distribución uniforme lo que concuerda con los resultados esperados: las distribuciones de fase no presentan ningún valor predominante. Compensando, de esta forma, la naturaleza aleatoria del medio esparcido.

De acuerdo a los perfiles de intensidad obtenidos para este trabajo se puede inferir que el FWHM se desvía aproximadamente un pixel para cada región de interés. Esto significa que la optimización de la región de interés es mucho más exacta mientras mayor sea el área de optimización y viceversa.

El presente trabajo ha contribuido a la investigación de esta técnica para su aplicación a otras áreas como la telecomunicación y la óptica biomédica. Es de particular interés la aplicación de este trabajo al área médica y por esa razón el trabajo a futuro incluye: 1) mejorar los resultados reportados en este trabajo en términos de tiempo de optimización, 2) implementar y evaluar diferentes algoritmos de optimización, 3) cambiar el criterio de optimización por contraste en lugar de intensidad, 4) enfocar luz a través de muestras biológicas como cartílagos y dientes, y finalmente, 5) implementar esta técnica en la visualización de vasos sanguíneos inmersos en piel.

Referencias

- [1] I.M. Vellekoop . *Controlling the propagation of light in disordered scattering media*. Tesis Dr. Universiteit Twente, the Netherlands. 144 p.
- [2] C. Stockbridge; Y. Lu; J. Moore; S. Hoffman; R. Paxman; K. Toussaint and T. Bifano. *Focusing through dynamic scattering media*. Optics Express. Vol. 20, Issue 14. (2012).
- [3] O. Katz; E. Small and Y. Silberberg. *Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light*. Nature Photonics. Vol. 6. 549–553 (2012).
- [4] Vázquez Olivós, María de los Ángeles Josefina. *Caracterización de una pantalla de cristal líquido nemático como modulador de fase*. Tesis Mag. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica Y Electrónica. 165 p.
- [5] I. M. Vellekoop, P. Lodahl, and A. Lagendijk. *Determination of the diffusion constant using phase-sensitive measurements*. Physical Review E 71. 056604. (2005).

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Propagación de luz a través de un material transparente como el vidrio. Sistema de lentes positivas de material transparente, cada lente $L1$ y $L2$ con una longitud focal característica $f1$ y $f2$ | 4 |
| Figura 2. Distribución de intensidad de la luz esparcida al atravesar un medio opaco. | 5 |
| Figura 3 Enfoque de luz a un objetivo pequeño mediante aplicación de conjugación de fase óptica. | 24 |
| Figura 4. Ejemplo de imagen de distribución de fase para sintetizar un frente de onda óptico para lograr enfoque en una región de interés particular..... | 27 |
| Figura 5. Elementos básicos para lograr enfoque a través de un medio esparcidor. | 36 |
| Figura 6. Estructura molecular de los cristales líquidos nemático, colestérico y esmétrico..... | 38 |
| Figura 7. Estructura básica de un modulador espacial de luz de cristal líquido nemático. | 39 |
| Figura 8. Rejillas binarias de transmitancia compleja utilizadas en la caracterización del SLM, la celda básica consta de dos niveles de gris diferente permaneciendo fijo el nivel 255 y variando la otra franja con los niveles de gris a)0, b) 45, c) 90, d)135, e)180 y f)225. | 42 |
| Figura 9. Arreglo experimental utilizado para caracterizar el SLM..... | 43 |
| Figura 10. Arreglo experimental utilizado en los experimentos para lograr enfoque a través de un medio esparcidor. | 48 |
| Figura 11. Cinta Scotch 3M utilizada como medio esparcidor. | 48 |
| Figura 12. Imágenes de la distribución de intensidad de rejillas binarias de fase de transmitancia compleja con celdas básicas: a)255-0, b)255-45, c)255-90, d) 255-135, e) 255-180 y f) 255-225. | 52 |
| Figura 13. Máscaras utilizadas para seleccionar las coordenadas en las que se encontraban los máximos los mínimos de intensidad..... | 53 |
| Figura 14. Nivel de fase que genera cada nivel de gris en el SLM PLUTO NIR con longitud de onda de 1064 nm..... | 54 |
| Figura 15. Coeficiente de correlación medido durante 30 minutos, tiempo aproximado de duración de la optimización de 256 segmentos. | 55 |
| Figura 16. Coeficiente de correlación medido durante 120 minutos, tiempo aproximado de duración de la optimización de 1024 segmentos..... | 56 |
| Figura 17. Gráfica de nivel de gris promedio en el pixel optimizado en función del número de iteración o número de segmentos correspondiente para cada prueba. .. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 18. Factor de mejora en función del número de iteraciones para pruebas de 16, 64 y 256 segmentos, el nivel de mejora obtenido varía desde 46, 90 y 255 veces respectivamente. | 59 |
| Figura 19. Enfoque a través de un medio esparcidor en región de interés en 1 pixel. Al fijar la fase a un segmento particular se toma una imagen correspondiente a la distribución de intensidad. a), b), c) y d) Imagen de fase enviada al modulador después de realizar la iteración número 64, 128, 192 y 256 respectivamente. e),f), g) y h) Distribución de intensidad registrada por la cámara después de la iteración 64, 128, 192 y 256 respectivamente..... | 60 |
| Figura 20. Figura 4.3.1.4. Histograma de frecuencias correspondiente a la prueba de enfoque de luz en 1 pixel en la región central. La fase predominante es 1.875π correspondiente al nivel de gris 250. | 61 |
| Figura 21. Nivel de gris promedio alcanzado para optimizaciones de 16, 64, 256 y 1024 segmentos en función del número de iteración para región de interés de 9 pixeles..... | 62 |
| Figura 22. Factor de mejora alcanzado por optimización de 16, 64, 256 y 1024 segmentos para región de interés de 9 pixeles. | 63 |
| Figura 23. Las imágenes a), b), c) y d) muestran las imágenes de fase para optimización de 256, 512, 768 y 1024 segmentos respectivamente. En los apartados e), f), g) y h) se encuentran sus correspondientes distribuciones de intensidad..... | 65 |
| Figura 24. Histograma de frecuencias de nivel de gris para optimización de 1024 segmentos en región de interés de 9 pixeles en el área central de la CCD..... | 65 |
| Figura 25. 3.1. Nivel de gris promedio con optimización con 16, 64, 256 y 1024 segmentos para región de interés de 25 pixeles en el área central de la CCD..... | 66 |
| Figura 26. Factor de mejora para optimización con 16, 64, 256 y 1024 segmentos en una región de interés de 25 pixeles en el área central de la CCD. | 67 |
| Figura 27. Evolución de optimización de 1024 segmentos en una región de 5x5 pixeles sobre la región central del detector. Las imágenes a), b), c) y d) muestran las imágenes de fase optimas enviadas al modulador para lograr enfoque. Las imágenes e), f), g) y h) muestran las distribuciones de intensidad correspondiente a la imagen de fase de la columna izquierda para 256, 512, 768 y 1024 segmentos. | 69 |
| Figura 28. Histograma de frecuencia de fases para optimización de 1024 segmentos sobre una región de interés de 5x5 pixeles. | 69 |
| Figura 29. Perfiles de intensidad en nivel de gris para 1, 3 y 5 pixeles en el área central de la CCD..... | 70 |
| Figura 30. Nivel de gris promedio en la región de interés de 41 pixeles en el área central de la CCD..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 31. Factor de mejora para optimización de 1024 segmentos de fase en una región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD..... | 72 |
| Figura 32. Evolución de la optimización de 1024 segmentos en región de interés de 41 píxeles. Las imágenes a), b), c) y d) muestran la imagen de fase óptima para las iteraciones 256, 512, 768 y 1024; mientras que las imágenes e), f), g) y h) muestran la distribución de intensidad respectivamente. | 73 |
| Figura 33. Histograma de frecuencias de fase con optimización de 1024 píxeles en región de interés de 41 píxeles en el área central de la CCD..... | 74 |
| Figura 34. Nivel de gris alcanzado en función del número de iteración para optimización de 256 y 1024 segmentos en región de interés de 1 píxel fuera de la región central de la CCD. | 75 |
| Figura 35. Factor de mejora para optimización de 256 y 1024 píxeles en región de interés de 1 píxel fuera de la región central de la CCD. | 76 |
| Figura 36. Optimización de 1024 segmentos en región de interés de 1 píxel fuera de la región central. Donde a), b), c) y d) muestran las imágenes de fase de 256, 512, 768 y 1024 iteraciones con sus respectivas imágenes de distribución de intensidad e), f), g) y h)..... | 77 |
| Figura 37. Histograma de frecuencia de nivel de fase para optimización de 1024 segmentos para un píxel fuera del área central de la CCD..... | 78 |