



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**PRINCIPIOS BÁSICOS DE HOLOGRAFÍA: EXPERIMENTO
DE YOUNG**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

MARIA GUADALUPE GABRIEL RESENDIZ

DIRIGIDA POR:

DR. ESTEBAN RUEDA SORIANO

DRA. KARINA ALEMÁN AYALA



MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA
 Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

OFICIO EYT/382/15

P.D.I.E.T. MARÍA GUADALUPE GABRIEL RESÉNDIZ

PRESENTE

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al trabajo de titulación **“PRINCIPIOS DE HOLOGRAFÍA: EXPERIMENTO DE YOUNG”** y que después de revisarlo en reunión de sinodales, han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:	Dr. José Luis González Vidal	
PRIMER VOCAL:	Dra. Karina Alemán Ayala	
SEGUNDO VOCAL:	Dr. Esteban Rueda Soriano	
TERCER VOCAL:	Dr. Heberto Gómez Pozos	
SECRETARIO:	Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas	
PRIMER SUPLENTE:	Ing. Claudio Iván Durán Marroquín	
SEGUNDO SUPLENTE:	Dr. Obed Pérez Cortés	

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 05 de Junio de 2015.

Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas
 Coordinador de la Licenciatura en Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones

C.c.p. Archivo

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería y en especial a CEDAI por las facilidades que obtuve para trabajar en sus instalaciones y en sus laboratorios de investigación.

Al Dr. Esteban Rueda Soriano, por todas las oportunidades que me ha brindado para mi crecimiento profesional, en el ámbito de investigación y laboral, por instruirme en otras áreas de conocimiento y por enseñarme que la perseverancia es importante para alcanzar las metas.

A la Dra. Karina Alemán Ayala por todo el apoyo, por el tiempo dedicado, por los conocimientos nuevos que me brindó para el desarrollo de esta investigación, por sus orientaciones, su paciencia y su constancia.

A Patronato Universitario por la beca FESE otorgada, sin el cual no habría sido posible desarrollar este trabajo.

Al Dr. Heberto Gómez Pozos, al Dr. José Luis González Vidal, Al Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas, al Dr. Obed Pérez Cortés y al Ing. Claudio Iván Durán Marroquín, Miembros del Jurado, por contribuir con sus observaciones y comentarios para mejorar este trabajo.

A mis profesores de la carrera de la licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones que formaron las bases de mi profesión.

A mis compañeros de la carrera por trabajar en equipo, por enseñarme tantas cosas y por lo que aprendimos juntos.

A mis compañeros de CEDAI por su apoyo y su amistad.

Y a todas las personas que no mencioné pero han sido participes en mi formación profesional.

Con admiración y respeto.

Dedicatorias

A mi Poder Superior por Su luz, Su paz, Su amor, Sus enseñanzas y las bendiciones que me da cada día de mi vida.

A Cristina, mi mejor amiga, por el sacrificio constante, jamás encontraré la forma de agradecer tu amor y confianza.

A Alfonso, guía de mi camino, por apoyar mis decisiones y por las lecciones que me has enseñado.

De no haber sido por su apoyo, jamás habría llegado a la cima, la herencia más valiosa que he podido recibir.

A Pedro Gabriel de la Cruz[†], mi ángel guardián, mi protector incondicional, quien toda la vida me apoyó, me dio consejos y su cariño. “Abuelito, en mi ser, en mi corazón y en mis acciones vivirás siempre”.

A Guadalupe Núñez, por ser un pilar importante en mi vida. En ella y Fabián he encontrado el gran apoyo que necesité para culminar mi carrera profesional.

A Ana, mi gemela y mi cómplice.

A María Cruz por su amor de madre.

A mis tíos y primos.

A los amigos que fueron, que son y que serán.

Con emoción y gratitud permanente.

Resumen

En la presente tesis se ha documentado la información más relevante de los principios de la holografía, partiendo de un estudio general de las propiedades de la luz y de sus fenómenos como onda electromagnética, específicamente en difracción e interferencia que son los principios para elaborar hologramas. De la misma forma, se determinaron principios de arreglos interferométricos y la metodología necesaria para aplicarlos en otras tecnologías.

Siguiendo la metodología planteada se representó en el laboratorio el experimento de Young con el equipo óptico de Newport. Para obtener fuentes de ondas secundarias se usó un láser y aberturas que fueron de cuatro formas: rectangular, cuadrada, circular y rendija y como resultado se obtuvieron patrones de difracción e interferencia capturados con una cámara.

Se elaboró un programa en MATLAB para la simulación por computadora del experimento de Young mediante sus ecuaciones matemáticas, encontrado una congruencia en cada uno de los patrones.

Además, se contrastaron resultados la interferencia de dos haces de luz láser con el experimento de Young en laboratorio y los patrones obtenidos en la simulación por computadora, considerando algunas variables propias del experimento y características como materiales, procesos, ventajas y desventajas entre cada uno.

Como conclusión, se demostró que, al cumplirse las condiciones generales de interferencia, tanto en el experimento como en la simulación, las franjas de interferencia son percibidas. Se distinguió la relación y diferencia entre la difracción e interferencia. Con esta investigación se establecieron las bases para desarrollar holografía y algunas aplicaciones como trabajo futuro.

Índice general

Agradecimientos	III
Dedicatorias	IV
Resumen	V
Índice general	VI
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	X
Capítulo 1 Presentación	13
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2. Objetivos	14
1.1.1. General	14
1.1.2. Específicos	14
1.3. Justificación	16
1.4. Metodología	18
1.5. Estado del Arte	20
Capítulo 2 Antecedentes y definiciones de holografía	25
2.1. Naturaleza ondulatoria de la luz	25
2.2. Propiedades y fenómenos de la luz	35
2.2.1. Polarización	35
2.2.2. Refracción	37
2.2.2.1. Índice de refracción	38
2.2.3. Reflexión	39
2.2.3.1. Leyes de Snell	39
2.2.4. Difracción	40
2.2.5. Interferencia	41
2.2.5.1. Condiciones generales	42
2.2.5.2. Condiciones para interferencia	48
2.3. Holografía	50
2.4. Principios básicos de holografía: experimento de Young	53
2.5. Metodología para grabación y recuperación de hologramas	57

2.6. Aplicaciones de la holografía	60
2.6.1. Seguridad	60
2.6.2. Almacenamiento holográfico	61
2.7. Nuevas tecnologías aplicadas a la holografía	63
Capítulo 3 Arreglo interferométrico de Young	66
3.1. Experimento de Young armado con equipo de Newport	66
3.1.1. Equipo para armar el interferómetro de Young	66
3.1.1. Armado del interferómetro de Young con Newport	67
3.1.1.1. Recomendaciones generales para la instalación del experimento de Young con el equipo de Newport	69
3.2. Experimento de Young simulado por computadora	74
Capítulo 4 Resultados	79
4.1. Difracción de aperturas con distintas formas generadas en laboratorio	79
4.1.1. Difracción del círculo a distintos tiempos de exposición	79
4.1.2. Difracción del cuadrado a distintos tiempos de exposición	80
4.1.3. Rendijas por tiempo de exposición	81
4.1.4. Rectángulo por Tiempo de exposición	82
4.2. Interferencia de dos aperturas circulares mediante el experimento de Young generados en laboratorio	83
4.3. Interferencia de dos aperturas circulares mediante el interferómetro de Young generado en computadora	84
Capítulo 5 Discusión de resultados	89
5.1. Resultados del desarrollo de la metodología	89
5.2. Difracción del experimento con diferentes aberturas	92
5.3. Comparación de patrones de interferencia obtenidos en laboratorio y por computadora del experimento de Young	94
Capítulo 6 Conclusiones	99
6.1. Conclusiones generales	99
6.2. Trabajos futuros	101
Glosario	103
Bibliografía	105
Anexo	110

Índice General

A.1.	Datos generales del equipo de Newport	110
A.2.	Cuadrado por tiempo de exposición	113
A.3.	Círculo por tiempo de exposición	117
A.4.	Rendijas por tiempo de exposición	121

Índice de figuras

Figura 2.1 Naturaleza electromagnética de la luz _____	27
Figura 2.2 Función senoidal _____	30
Figura 2.3 El espectro electromagnético. (Young & Freedman). _____	31
Figura 2.4 Frentes de ondas _____	34
Figura 2.5 Polarización de una onda transversal _____	36
Figura 2.6 Propiedades de refracción y reflexión _____	37
Figura 2.7 Difracción a través de una rendija estrecha _____	40
Figura 2.8 Dennis Gabor mostrando el registro de un holograma fuera de eje de un objeto transparente (Segrè, 1971) _____	52
Figura 2.9 Representación de la interferencia de dos haces por el experimento de Young _____	54
Figura 2.10 Óptica geométrica del experimento de Young _____	55
Figura 2.11 Representación de un método para exposición y reconstrucción de un holograma (Malacara, 1989). _____	58
Figura 3.1 Conjunto del láser de Newport (Newport Corporation) _____	67
Figura 3.2 Diagrama del experimento de Young _____	67
Figura 3.3 Representación del experimento de Young con el equipo de Newport _____	68
Figura 3.4 Representación ampliada de las formas de las aperturas _____	72
Figura 3.5 Haz del láser del experimento de Young _____	73
Figura 3.6 Experimento de Young con equipo de Newport _____	73
Figura 3.7 Pantalla de comandos en MATLAB _____	74
Figura 3.9 Plano de dos aberturas en MATLAB _____	76
Figura 3.10 Patrón de interferencia en MATLAB _____	76
Figura 5.1 Experimento de difracción antes del equipo de Newport _____	89
Figura 5.2 Difracción de una apertura circular _____	90
Figura 5.3 Patrón de difracción _____	91
Figura 5.4 Patrón de interferencia formado por dos aperturas circulares _____	91

Índice de tablas

Tabla 2-1 Clasificación del espectro electromagnético de acuerdo a su longitud de onda, frecuencia y energía	32
Tabla 4-1 Abertura circular a 1m de distancia	79
Tabla 4-2 Abertura cuadrada a 1m de distancia	80
Tabla 4-3 Rendija a 1m de distancia.....	81
Tabla 4-4 Abertura rectangular a 1m de distancia.....	82
Tabla 4-5 Interferencia de dos aperturas circulares a de 5cm a 6m	83
Tabla 4-6 Pantalla de Aberturas y Pantalla de interferencia.....	85
Tabla 4-7 Pantalla de interferencia a distintas variables S.....	86
Tabla 4-8 Pantalla de interferencia variando la longitud de onda (λ).....	87
Tabla 5-1 Comparación progresiva de figuras de 0.5m a 6m de distancia con exposición de 1/1250s.....	92
Tabla 5-2 Comparación de patrones de interferencia de laboratorio y simulación.....	96

Introducción

La luz ha tenido distintos significados a través de la historia de la humanidad, todos ellos la describen de forma virtuosa. Ahora entendemos a la luz como una parte visible de la radiación electromagnética que aporta información, analizándola con distintos instrumentos, y manipulándola tanto como la ciencia y tecnología de hoy le ha permitido a la humanidad. Dependiente de la fuente que la produce y también del camino que recorre, podemos percibirla desde una estrella a varios años luz de distancia, hasta el foco artificial que ilumina la estancia en las habitaciones.

La luz tiene distintas propiedades ondulatorias. Viaja en línea recta, pero a veces, dependiendo de las condiciones, puede “rodear” obstáculos: a este fenómeno se le denomina difracción. La interferencia como fenómeno de la luz, es la interacción de dos o más ondas luminosas con condiciones parecidas. Ejemplo cotidiano son los colores de una burbuja de jabón, debido a que la luz blanca del entorno de un día soleado, al refractarse y reflejarse en las películas de la burbuja, los rayos interfieren entre sí, provocando las franjas de colores.

En el presente documento se analiza el primer experimento que demostró la naturaleza ondulatoria de la luz: el experimento de Young, que consiste generalmente en crear dos fuentes secundarias de luz a partir de una fuente de luz primaria coherente. Las fuentes secundarias son creadas en una pantalla usando pequeñas aberturas que tienen una distancia muy estrecha entre sí y dependiente de la distancia entre la pantalla de aperturas y la pantalla donde se proyecta el patrón. Requiere de una serie de variables y condiciones para que la interferencia pueda ser percibida.

Con el estudio del comportamiento de la luz y la invención del láser en 1960, nació la interferometría, que dio paso al desarrollo de muchos experimentos. Entre ellos, la invención del holograma hecho por Dennis Gabor. La interferencia es la base fundamental para crear hologramas, y el mejoramiento de interferómetros puede ayudar a evolucionar el grabado de hologramas, entre otras aplicaciones.

Capítulo 1

Presentación

Este capítulo plantea un esquema general de los alcances de la investigación, la problemática a resolver, los objetivos, la justificación, la metodología y otros aspectos generales de este trabajo de investigación.

Capítulo 1 Presentación

1.1. Planteamiento del problema

La tecnología avanza notablemente, por lo que se debe profundizar en el estudio de otras áreas de la ciencia, para modernizar técnicas, mejorar resultados de procesos, el uso de nuevos mecanismos de medición, entre otros objetivos.

En la actualidad se busca revolucionar la forma de obtener información de nuestro entorno. Uno de los rezagos de la tecnología se percibe en las imágenes, que son representaciones de objetos que hasta entonces han sido en forma bidimensional. Otro obstáculo tecnológico se presenta en el almacenamiento de información, en donde cada vez se reduce más el espacio a un límite físico. Por ello, se debe optar por otras soluciones y desarrollar nuevas tecnologías. Como alternativa, se puede aplicar la interferometría y la holografía, que además tienen una relación estrecha entre sí.

En el Área Académica de Computación y Electrónica de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, no se disponía de equipo para el estudio en Óptica, por el alto costo que implica adquirir algunas herramientas con el fin de que los alumnos e investigadores realicen experimentos distintos fenómenos físicos que como la interferencia o difracción de la luz y sus distintas aplicaciones, que permita a los investigadores y alumnos de ingeniería o afines, desarrollar distintos experimentos para profundizar el estudio de temas relacionados con el procesamiento de imágenes, algunos fenómenos físicos u ópticos, mecanismos de medición, el almacenamiento de información, caracterización óptica, entre otras aplicaciones. De igual modo, no se han desarrollado suficientes simulaciones conocidas en software que permitan el análisis de las diversas propiedades de la luz como onda electromagnética. Además, en esta universidad, la mayoría de los temas relacionados con el espectro electromagnético visible sólo se estudian de forma teórica y puede no despertar suficiente interés de algunos alumnos que lleven en su formación profesional el estudio de ondas electromagnéticas y/u Óptica en la materia de Física.

1.2. Objetivos

1.1.1. General

Estudiar el espectro electromagnético visible en la longitud de onda de 633nm usando un láser, mediante los fenómenos de interferencia y difracción por medio del experimento de Young y simulaciones por computadora.

1.1.2. Específicos

1. Analizar y documentar en un marco teórico las condiciones ideales del espectro electromagnético visible para producir los fenómenos de interferencia y difracción.
2. Definir la relación entre los fenómenos el espectro electromagnético visible, los sistemas interferométricos y la holografía.
3. Construir el experimento de Young con equipo de Newport para observar el fenómeno de difracción utilizando fuentes de luz provenientes de aberturas con geometrías tales como: rectángulos, círculos, rendijas y cuadrados, utilizando un láser de longitud de onda de $\lambda=633\text{nm}$ como fuente de luz.
4. Desarrollar experimentalmente la metodología para observar el fenómeno de interferencia de dos fuentes provenientes de orificios con geometría circular.
5. Obtener el patrón de interferencia mediante un sensor óptico de alta velocidad cambiando los parámetros de los arreglos interferométricos como la distancia de las fuentes al plano de interferencia, el tamaño de la rendija y comparar los patrones de interferencia.
6. Desarrollar el programa para obtener los fenómenos de interferencia por medio de la simulación por computadora.

7. Comparar los patrones de interferencia y difracción del experimento de Young con las imágenes obtenidas de la simulación por computadora.
8. Formular las conclusiones e identificar cuáles son las condiciones idóneas para el grabado de hologramas.

1.3. Justificación

Las propiedades de la luz se comportan de acuerdo a la fuente luminosa que las genera. Refracción, reflexión, por mencionar algunas propiedades generales o la polarización, interferencia y difracción como fenómenos ondulatorios de la luz.

Estos fenómenos, en particular la interferencia, pueden aplicarse como una herramienta para medición: por ejemplo, en el entorno se producen perturbaciones que no llegan a ser perceptibles a simple vista, pero al producir un patrón de interferencia de dos haces de luz láser, las perturbaciones llegan a ser más notorias. Por la alta precisión y sensibilidad de los interferómetros, se usan como guía de medida para elementos que sufren cambios y no son apreciables para el ojo humano u otros sistemas de medición, para la creación de hologramas, para transmitir información o almacenarla de una manera más eficiente que las tecnologías convencionales. Además, se puede dar ciertas condiciones a la luz como onda y manipular la información que porta mediante su fase, su amplitud, su frecuencia, entre otros parámetros propios de una onda.

La presente tesis, ha surgido por el interés del aprendizaje del espectro electromagnético visible. Se recopila información y se elabora un sustento teórico sólido para comprender a la luz como onda electromagnética, así como sus propiedades ondulatorias, en específico la difracción e interferencia. Por esta razón se ocupan herramientas de la óptica para esta investigación, de la misma forma que en la electrónica se usan los principios de las ondas electromagnéticas. Se plantea y se aplica una metodología para armar el primer arreglo interferométrico que se ha inventado: el experimento de Young. Además, el presente documento pretende ser la base para futuras investigaciones y aplicaciones que profundicen el análisis del fenómeno de interferencia mediante otros arreglos interferométricos y aplicaciones que sean desarrolladas en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, particularmente en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, que se relacionen con la física, óptica y/o electrónica.

Por ende, se han analizado las imágenes que son obtenidas del experimento de Young montado con el equipo de Newport asignándole variables y condiciones propias de experimento. A la vez se contrastan algunas de las variables con un programa diseñado en la herramienta de software matemático MATLAB que calcula la irradiancia obtenida de la interferencia de dos haces. Por último, se hace una comparación general de los patrones de interferencia generada en el laboratorio y los que se obtienen por computadora.

Los fenómenos físicos analizados de forma teórica en este documento también se demuestran experimentalmente, por consecuencia, se implementan y perfeccionan técnicas para el desarrollo de sistemas interferométricos y se obtienen resultados reales y conclusiones propias.

Una de las desventajas del desarrollo de estos experimentos con equipo de laboratorio se percibe cuando no se cuenta con el equipo o los recursos adecuados para la adquisición de instrumentos de física, ya que el costo es elevado. Como alternativa se han desarrollado las simulaciones en MATLAB para obtener resultados ideales y poder compararlos entre ellos.

La interferometría como un conjunto de técnicas para producir interferencia y tiene otras aplicaciones: por ejemplo, en el ámbito industrial, la interferometría y la metrología óptica, emplean la precisión que producen estos sistemas para medir distancias pequeñas (basándose en la longitud de onda) y se pueden utilizar para medir las deformaciones de una superficie que no son detectables para otros instrumentos de mediciones. De igual forma en la alineación de objetos, cambios de índice de refracción, y medición de ángulos muy pequeños. También se relacionan con la espectroscopia y con la astronomía, por citar algunas aplicaciones. Se puede consultar en el Estado del Arte de esta tesis, algunas investigaciones relacionadas con la interferometría.

1.4. Metodología

El propósito de este estudio es entender los antecedentes, los alcances y el impacto que ha tenido el experimento de Young para comprender al fenómeno de interferencia. Después de los conocimientos teóricos adquiridos necesarios para el experimento, se arma físicamente para evaluar los resultados e inconvenientes y comprobar si es factible para el desarrollo de holografía y otras aplicaciones. Los pasos a seguir para la presente tesis han sido:

1. Investigación en distintas fuentes de consulta relevantes para la comprensión de la luz como onda electromagnética y sus propiedades.
2. Análisis general de los fenómenos de difracción e interferencia.
3. Investigación de la holografía como una de las aplicaciones de la interferencia y los métodos para producir hologramas, primordialmente los interferómetros como proceso de grabado.
4. Elección del arreglo interferométrico “Experimento de Young”.
5. Desarrollo de la metodología y las técnicas adecuadas para realizar el experimento de Young en laboratorio.
6. Cambiar las variables en el arreglo interferométrico que sean permitidas de acuerdo al análisis matemático, para obtener distintos patrones de interferencia y difracción mediante fotografías.
7. Desarrollar la metodología y las técnicas adecuadas para realizar simulaciones del experimento de Young.
8. Calcular las mismas variables que se tomaron en cuenta en el arreglo interferométrico para producir los patrones de interferencia computacionales.
9. Comparación de resultados del arreglo experimental con las simulaciones por computadora.

10. Análisis de los datos y de los resultados obtenidos.
11. Discusión de los resultados con la teoría de este documento y con otros trabajos de investigación afines a los temas abordados en este documento de investigación.
12. Conclusiones de la investigación.

1.5. Estado del Arte

La difracción es un fenómeno en el cual un frente de onda en ciertas condiciones, modifica su trayectoria al interactuar con el borde de un objeto. Por su parte, la interferencia es el resultado de la interacción temporal y espacial de dos (o más) ondas electromagnéticas.

En esta investigación se eligió una longitud de onda que es parte del espectro visible para reproducir los fenómenos de difracción e interferencia. Los fenómenos ondulatorios mencionados son explotados en diferentes aplicaciones e incluso se usan para predecir el desempeño de algún sistema óptico.

A continuación, se muestran las investigaciones que se recopilaron para conocer los desarrollos existentes de interferencia y el proceso holográfico ligado a este fenómeno.

Non-contact performance analysis of the core materials by digital holographic interferometry (Şan, Ustabaş, & Saraç, 2015)

En este artículo, se determinó cómo un material de núcleo se comporta bajo la influencia de un campo magnético estático (MF), que causa pérdidas magnéticas en máquinas eléctricas. Para ello, se diseñó un sistema óptico, que puede determinar el rendimiento de los materiales del núcleo bajo efecto MF. En primer lugar, cuando los materiales de núcleo estándar están expuestos a una MF, estos materiales hacen movimientos de rotación. La cantidad de rotación se calcula entonces y la cantidad de trabajo hecho después de esta rotación se realiza un seguimiento. En consecuencia, a partir de las cantidades de trabajo, se puede decidir si los materiales son aptos para el núcleo o no. Esto muestra que el sistema óptico puede hacer un análisis de rendimiento sin contacto por las materias en determinados grosores, que pueden ser el material del núcleo. Por lo tanto, este sistema se puede utilizar para determinar si el material del núcleo recién fabricado, es una buena función de las cantidades de trabajo obtenidos para equivalentes

estándar. Al mismo tiempo, se menciona en este artículo que es el primer estudio sobre el análisis de rendimiento de los materiales básicos obtenidos por métodos ópticos.

An Introduction to the Principles and Applications of Holography (Goodman, 1971)

En este artículo, se describen varios tipos de hologramas: delgado o grueso, por transmisión o reflexión, hologramas de amplitud y fase. Se introducen las propiedades importantes de cada tipo de holograma.

Un estudio de diversas aplicaciones de la holografía se presenta, con introducciones a la utilización de la holografía en interferometría, microscopía, imágenes a través de medios de distorsión, el procesamiento óptico de datos, almacenamiento de datos óptico. También se describe el uso de hologramas simples como elementos ópticos.

Se concluye que la ventaja de la holografía en este caso radica en la extrema sencillez de las operaciones de "decodificación": los datos almacenados se recuperan a la velocidad de los cálculos de decodificación utilizando la luz adecuada

Una segunda ventaja importante de la holografía, en particular en un sistema de almacenamiento de alta densidad, proviene de la capacidad de obtener una gran ampliación de los datos de imagen sin un aumento correspondiente de los errores de registro.

Built-in-Mask Microfluidic Chip for Highly-Sensitive Young Interferometry-based Refractometer Structure (Chaitavon & Sumriddetchkajorn, 2012)

En este artículo, se propone un chip de microfluidos incorporado en una máscara de dos canales de flujo, para su uso en la estructura de un refractómetro altamente sensible basado en interferometría de Young, eliminando así por completo una técnica de alineación de alta precisión. Otras funciones clave incluyen componentes bajo conteo, compacidad y facilidad de implementación.

La idea principal es hacer el área que rodea los dos canales de flujo opacos, utilizando un material negro (por ejemplo, silicona negro). Una vez que el haz óptico entrante pasa a través de los dos canales de flujo, se divide automáticamente en dos haces ópticos que interfieren entre sí en el plano de detección de dos dimensiones, la eliminación de una técnica de alineación de alta precisión previamente requerida entre una máscara externa y el chip de microfluidos. El concepto de la prueba experimental es utilizando un chip de microfluidos de dos canales de flujo con una relación de separación de canales y la profundidad de 3, un diodo láser de longitud de onda 635 nm, y un 1.600×1.200 píxeles del sensor de imagen muestra una alta medida 4.28×10^{-5} RIU / sensibilidad de píxeles con una resolución de medición.

Caracterización del espesor de películas delgadas de nanopartículas de oro embebidas en TiO₂ sobre prótesis de titanio mediante interferometría láser (Mendoza Basilio, 2011)

Ésta tesis, de grado de maestría, donde emplean principios de óptica ondulatoria para estudiar una estructura biomecánica recubierta con un material nanoestructurado. Se estudió el espesor de la mencionada película con un interferómetro tipo Michelson que genera dos haces provenientes de la misma fuente luminosa para efectuar la medición. La interferencia de la luz de este interferómetro genera un patrón de anillos o franjas, que responden a cambios en el camino óptico de cada uno de los haces. De estas cualidades resulta que éste sea un dispositivo de alta precisión, dado que trabaja con longitudes de onda de la luz empleada como patrón de medida.

La evaluación del sistema interferométrico de esta investigación permitió conocer las posibilidades de aplicación en otros tipos de análisis y caracterización de superficies.

Simulación de la Difracción de Pulsos Ópticos Producidos por Rendijas Cuadradas y Circulares (Babilonia Perez, 2012)

Se describe en este documento cómo se utilizó la relación de Fresnel para la difracción y se implementó el método de la transformada rápida de Fourier (FFT) para analizar la propagación de un frente de ondas planas y monocromáticas al pasar por diferentes tipos de rendijas. Se simuló en Matlab y se proyectó el patrón de difracción e irradiancia en un plano de observación al cual se le variaba la longitud de propagación, observándose el comportamiento de los diferentes patrones. También se dispuso las rendijas de tal manera que se observara el fenómeno de interferencia de Young y su evolución en función de la distancia.

Capítulo 2:

Antecedentes y definiciones de holografía

El capítulo dos aborda conceptos básicos de la luz y su comportamiento ondulatorio, describiendo fenómenos como la difracción e interferencia, además de interpretar el experimento de Young. Descripción general de la holografía y su metodología.

Capítulo 2 Antecedentes y definiciones de holografía

2.1. Naturaleza ondulatoria de la luz

Responder a la pregunta: “¿Es la luz una partícula o una onda?” llevó a muchas investigaciones a través del tiempo y posteriormente fue uno de los campos de investigación más importantes en el estudio de la Física, particularmente en la Óptica.

Desde los filósofos de la antigüedad hasta los científicos de la actualidad han debatido sobre la naturaleza de la luz: mientras algunos realizaban experimentos y defendían fervientemente a la luz como una partícula con características de la materia, otros demostraban sus hipótesis de que la luz eran simplemente ondas. Se llegó a utilizar las bases de la mecánica cuántica, hasta inicios del siglo XX con la Teoría del efecto fotoeléctrico de Albert Einstein (1879–1955) (López Sancho, Gómez Díaz, & Moreno Gómez, 2006).

La partícula o también llamado corpúsculo, es la porción más diminuta de la materia; su característica principal es que existe en un lugar en el espacio <<pequeño>> y bien definido. Por otro lado, se describe a la onda como una perturbación autónoma de un medio, que se mueve en el espacio transportando energía e impulso (Hecht, 2000).

Hoy en día, hemos adoptado la naturaleza de algunas partículas, entre ellas a la luz que es una radiación electromagnética, como dualidad de una partícula llamada “fotón” y su comportamiento en ciertas condiciones como onda.

Erwin C. Schrödinger (1887–1961), uno de los fundadores de la teoría cuántica, afirmó: <<En el nuevo marco de ideas, la distinción entre partículas y ondas ha desaparecido, porque se descubrió que todas las partículas tienen también propiedades ondulatorias y viceversa. No se debe desechar ninguno de los dos conceptos, sino que ambos deben amalgamarse. En el aspecto que sobresalga no dependerá del objeto físico sino del dispositivo experimental usado para examinarlo>> (Hecht, 2000)

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

Un avance fundamental que permitió esta integración e impulsó el desarrollo de la física cuántica fue una hipótesis, planteada por el físico francés De Broglie (1892-1987), donde se considera que toda entidad física (las partículas y también los fotones) tiene una naturaleza dual, de tal forma que su comportamiento global presenta dos aspectos complementarios: ondulatorio y corpuscular. Dependiendo del experimento predomina uno de estos dos aspectos. (Alonso Sánchez, Lozano del Águila, & Vallecillo)

Se hace mención al trabajo de J. Clerck Maxwell (1831–1879), quien definió matemáticamente a los campos eléctrico, magnético y la relación entre ellos. Los campos eléctricos se originan tanto por cargas eléctricas como por campos magnéticos variables en el tiempo. De manera análoga, los campos magnéticos son generados por corrientes eléctricas y por campos eléctricos variables en el tiempo, así que la interdependencia entre estos campos es un punto clave de la descripción de la luz. Comparando a las ondas electromagnéticas con las ondas luminosas, se observó que el comportamiento y la velocidad eran similares. (Hecht, 2000)

Tiempo después, Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) verificó experimentalmente de que la luz eran ondas electromagnéticas. En la Figura 2.1 observamos la disposición perpendicular entre un campo eléctrico y un campo magnético oscilando de manera ondulatoria con la misma dirección de propagación, formando una onda electromagnética. (Arca, 2006)

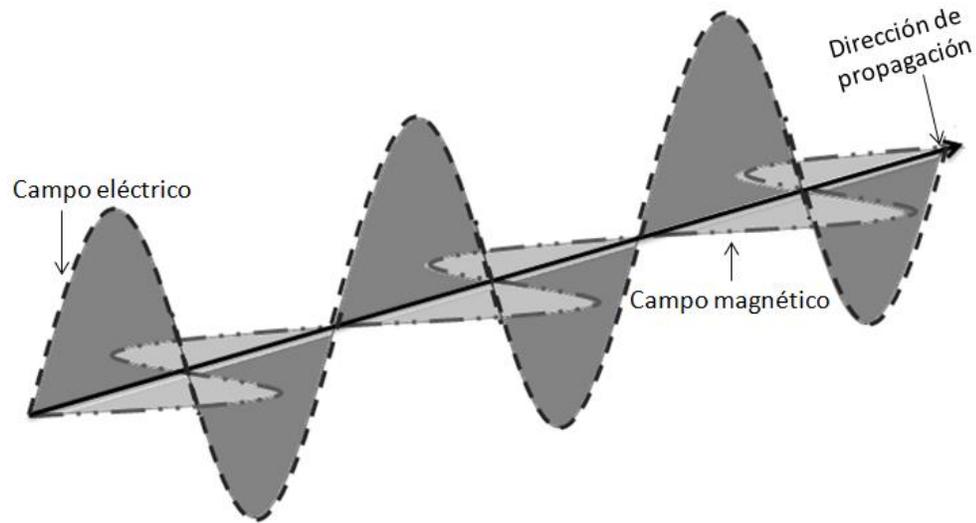


Figura 2.1 Naturaleza electromagnética de la luz

La rama de la física que estudia a la luz y su comportamiento ondulatorio, analizando sus características y propiedades es la Óptica.

Existen distintos tipos de ondas, de acuerdo al medio en que se propagan se dividen en ondas electromagnéticas, que no necesitan de un medio de propagación en el espacio, las ondas mecánicas que si necesitan de un medio material y en teoría las ondas gravitacionales que perturban el espacio-tiempo. De acuerdo a su propagación se dividen en ondas unidimensionales, tienen solo una dirección espacial, ondas bidimensionales que se desplazan en dos direcciones por una superficie y las ondas tridimensionales se desplazan en las tres dimensiones. De acuerdo a su dirección se dividen en ondas longitudinales, las ondas viajan paralelamente al medio en donde se propagan, y las ondas transversales, donde las ondas viajan perpendicularmente al medio en el que se está propagando. Y por último, de acuerdo a su periodicidad, se dividen en ondas periódicas, que son las tienen oscilaciones repetitivas, y las ondas no periódicas, donde sus oscilaciones tienen cualidades diferentes (Tiposde.org, 2014).

La luz como onda electromagnética puede propagarse en el vacío, además de que es una onda transversal porque los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a su

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

dirección de propagación, y generalmente se estudia como una onda periódica cuando se analiza de forma senoidal.

El conjunto de todos los puntos en el mismo lugar geométrico y mismo instante en que la fase de la onda es constante es el frente de onda. De acuerdo a la forma de frente de onda se clasifican en planas, circulares, cilíndricas y esféricas. Por ejemplo, un frente de onda plano se considera unidimensional ya que su propagación es orientada hacia una dirección particular. Asimismo un frente de onda circular se propaga en una superficie y se considera bidimensional. El frente de onda se dibuja en forma cilíndrica cuando la fuente está distribuida en un eje o en línea recta y el medio es isótropo. El frente de onda esférico se proyecta tridimensionalmente si la fuente puntual emite las ondas en todas direcciones con las mismas características radiales.

Se analiza las características e información que se considerará de una onda armónica senoidal; el movimiento armónico se caracteriza por mantener un estado repetitivo y queda descrito en función del tiempo por una función senoidal, ya que según la teoría ondulatoria, cada una de ellas puede describirse por una función de onda, como una señal descrita por la expresión:

$$y = A \sin (kx - \omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

En donde:

A = Amplitud [m]

T = Periodo [s]

λ = Longitud de onda [m., nm.]

$f = 1/T$ = Frecuencia [Hz, ciclos/s]

$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ = Frecuencia Angular [rad/s]

$k = 2\pi/\lambda$ = número de onda

φ = Fase de la onda [grados, rad.]

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

$$v = \lambda/T = \lambda f = \text{Velocidad de propagación [m/s]}$$

En la Figura 2.2 podemos ver las características de esta onda senoidal, representándose de forma gráfica la función $y = A \sin(kx - \omega t + \phi)$ y se utiliza al eje x como referencia, donde: A es la amplitud de la onda, el desplazamiento entre el eje x considerándola como la posición de equilibrio y la posición del máximo punto de la onda, mide la energía transportada por la onda, la parte superior es llamada cresta y la parte inferior denominada valle. El parámetro λ es la longitud de onda, la distancia comprendida entre dos crestas o entre dos valles. El periodo está definido por T , el tiempo necesario para que se desplace una distancia igual a su longitud de onda, formándose una oscilación completa. El número de ondas delimitado por k , que se forman completamente en la distancia 2π metros. La frecuencia representada por f , es el número de ondas o longitudes de onda que se generan en la unidad de tiempo (1 segundo). La velocidad v , es la distancia recorrida por una onda generalmente cada segundo. La frecuencia angular ω es la rapidez con la que varía el ángulo de la onda en el tiempo. La fase de la onda ϕ describe el punto inicial de oscilación de la onda en el tiempo.

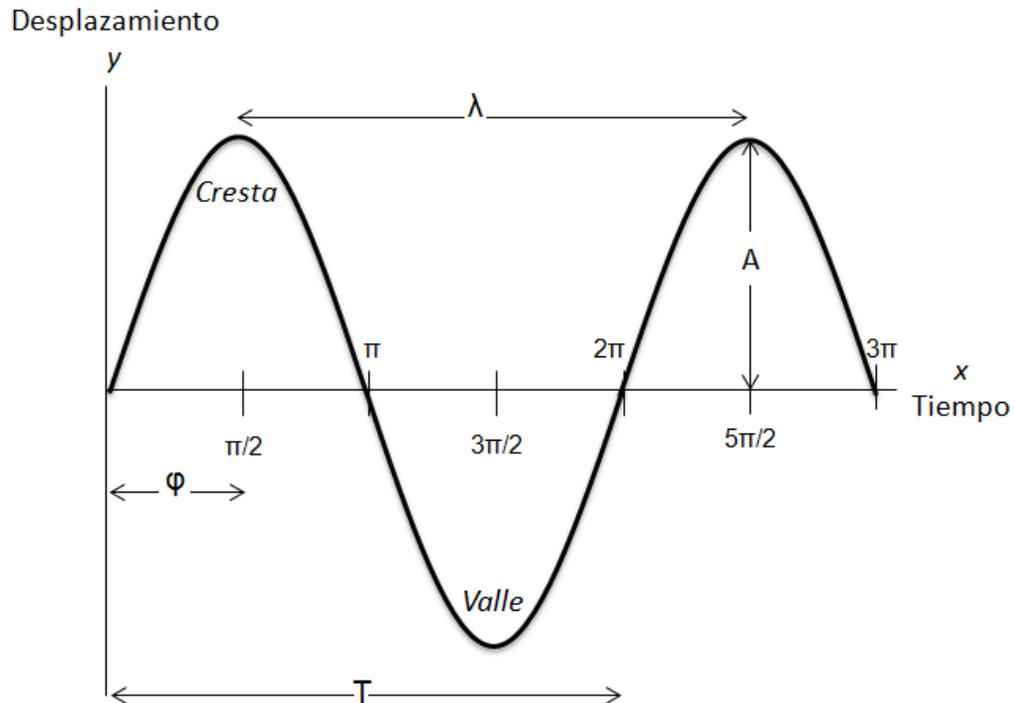


Figura 2.2 Función senoidal

Cuando se analiza una onda electromagnética, la amplitud es relacionada con la energía que contiene la onda electromagnética, y la fase proporciona la información del estado de oscilación de una onda con respecto a otra(s).

Las variables más importantes de una onda a considerar en esta investigación son la amplitud, la fase y la longitud de onda, explicando más adelante su relevancia en el tema de Interferencia.

El espectro electromagnético comprende un rango de frecuencias, desde las bajas frecuencias usadas para la radio moderna (extremo de la onda larga) hasta los rayos gamma (extremo de la onda corta), que cubren longitudes de onda de entre miles de kilómetros y la fracción del tamaño de un átomo. Algunas frecuencias son utilizadas en la vida diaria, como las ondas de radio que transmiten señales para televisión, telefonía móvil, radio FM, etc., dependiendo de la banda del espectro que se utilice. Las microondas cada vez tienen más incursión en las comunicaciones, de igual forma se

emplean en la investigación como en física y meteorología aunque el uso más cotidiano que hasta ahora hemos visto es en los hornos de microondas. En el caso de las ondas infrarrojas que son emitidas por objetos de acuerdo a la composición y temperaturas mayores al cero absoluto 0 K (-273°C), y son producidas artificialmente para diversas aplicaciones, como sensores infrarrojos, para comunicación a corta distancia, espectroscopia infrarroja, entre otros usos. En la Figura 2.3 se puede observar un gráfico representado de acuerdo a su longitud de onda y frecuencia. Se observa el rango pequeño que ocupa la luz que es objeto de estudio de esta investigación, limitada por los colores que pueden percibirse y que dependen de su longitud de onda $[\lambda]$. (Pérez Pérez, 2014)

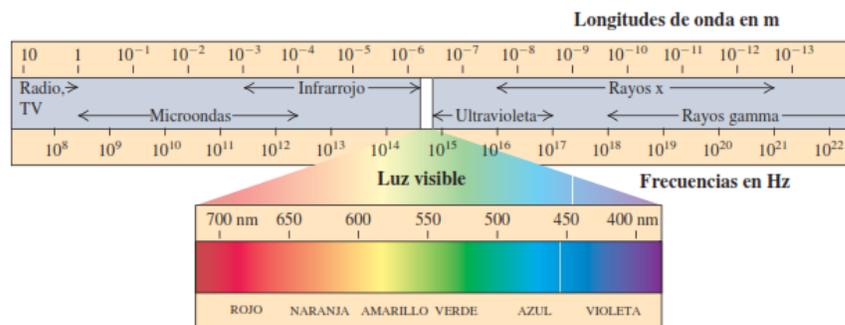


Figura 2.3 El espectro electromagnético. (Young & Freedman).

En la Tabla 2-1 se puede apreciar que la luz visible ocupa un pequeño rango en lo que compone al espectro electromagnético. Sin embargo, es de vital importancia porque el ojo humano puede percibirla, y la base de nuestros conocimientos se ha desarrollado a través de cosas perceptibles a los sentidos del ser humano, aunque en la actualidad se usan distintos instrumentos que permiten procesar información.

Tabla 2-1 Clasificación del espectro electromagnético de acuerdo a su longitud de onda, frecuencia y energía.

Banda		Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos Gamma		< 10 pm	> 30 Ehz	> $20 \cdot 10^{-15}$ J
Rayos X		< 10 nm	> 30 PHz	> $20 \cdot 10^{-18}$ J
Ultravioleta	Extremo	< 200 nm	> 1.5 PHz	> $993 \cdot 10^{-21}$ J
	Cercano	< 380 nm	> 789 THz	> $523 \cdot 10^{-21}$ J
Luz visible		< 780 nm	> 384 THz	> $255 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo	Cercano	< 2.5 μ m	> 120 THz	> $79 \cdot 10^{-21}$ J
	Medio	< 50 μ m	> 600 THz	> $4 \cdot 10^{-21}$ J
	Lejano	< 1 mm	> 300 GHz	> $200 \cdot 10^{-24}$ J
Microondas		< 30 cm	> 1 GHz	> $2 \cdot 10^{-24}$ J
Radio	Ultra alta frecuencia	< 1 m	> 300 MHz	> $19.8 \cdot 10^{-26}$ J
	Muy alta frecuencia	< 10 m	> 30 MHz	> $19.8 \cdot 10^{-28}$ J
	Onda corta	< 180 m	> 1.7MHz	> $11.22 \cdot 10^{-28}$ J
	Onda media	< 650 m	> 650 kHz	> $42.9 \cdot 10^{-29}$ J
	Onda larga	< 10 km	> 30 kHz	> $19.8 \cdot 10^{-30}$ J
	Muy baja frecuencia	> 10 km	< 30 kHz	< $19.8 \cdot 10^{-30}$ J

Respecto a la velocidad ondulatoria de la luz, a través de los siglos se especuló que era infinita y más adelante se llevaron a cabo distintos experimentos para calcularla, cada vez de manera más precisa. Hasta ahora, la velocidad de la luz en el vacío es una constante universal simbolizada con la letra c , con valor de 299.792.458 m/s (aproximándose a 3×10^8 m/s). Por el momento, se ha comprobado que la velocidad de la luz cambia cuando se propaga en medios materiales considerando algunas condiciones, primordialmente su permitividad eléctrica, su permeabilidad magnética, entre otras y

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

dependiendo del material se calcula con el índice de refracción, concepto que se definirá más adelante. (Macedo, 2013)

En los fenómenos de la luz como la interferencia, es posible observar el principio de superposición, cuando dos o más ondas se superponen, y la amplitud resultante se obtiene sumando la amplitud de cada una de las ondas. Posteriormente cada una de ellas sigue su dirección y transportan su misma energía. Cuando se compara la superposición de dos ondas sinusoidales, si éstas se originaron al mismo tiempo y con las mismas características, por consiguiente coinciden sus crestas y sus valles, estas dos ondas están en fase. Sin embargo, si las ondas surgieron en distinto tiempo una de la otra, aunque tengan las mismas características como la frecuencia, coincidirán parcial o totalmente una cresta y un valle en cierto momento dado, considerándose desfasadas. La fase constituye una de las características de la interferencia, como se analizará más adelante.

El “Principio de Huygens” ha ayudado a examinar distintos fenómenos ondulatorios, como prever la forma de un frente de ondas posterior después de conocer el frente anterior. Este principio fue desarrollado por Christian Huygens (1629 –1695), y aunque él aún no conocía características específicas de la luz, como su velocidad de desplazamiento, la longitud de la onda, o su forma de dispersión, pudo analizar comportamientos de frentes de onda anteriores para determinar frentes de onda posteriores de forma matemática con los conocimientos que había desarrollado en el campo de la geometría.

El principio de Huygens establece que:

“Todos los puntos en un frente de onda determinado se toman como fuentes puntuales para la producción de ondas esféricas secundarias, llamadas trenes de ondas, que se propagan hacia afuera por un medio con magnitudes de velocidad características de las ondas en ese medio. Después de algún intervalo de tiempo transcurrido la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a los trenes de ondas.” (Serway & Jewett, 2009)

Dicho de otro modo, el principio deduce que a partir de cada punto del frente de ondas primario se generan ondas secundarias, éstas producen ondas que se convierten en una envolvente. Las ondas conservan su frecuencia y su velocidad ya que tardan lo mismo en recorrer de un frente de ondas a otro.

Observando la Figura 2.4, donde el inciso a es el antiguo y nuevo frente de onda plano, y el inciso b es el antiguo y nuevo frente de onda esférica. Considerando una onda plana que viaja en el vacío, suponiendo que $t = 0$, AA' es un frente de onda plano, y solo se muestran algunas fuentes puntuales, del cual se dibuja un círculo con radio $c\Delta t$, siendo c la constante de la velocidad de la luz en el vacío y Δt es el tiempo en que se propaga de un frente de onda al otro. El plano BB' es trazado tangente a las fuentes puntuales y resulta paralelo a AA' . De igual forma se representa para una onda esférica.

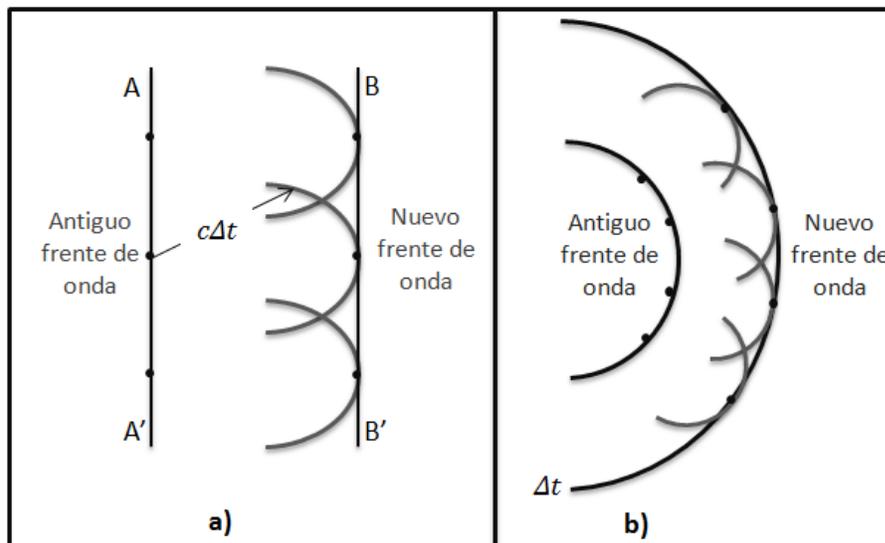


Figura 2.4 Frentes de ondas

La comprensión del comportamiento de la luz como una onda, ayuda a analizar distintos fenómenos. Otra perspectiva de análisis es la suposición de que cada punto de un objeto luminoso o iluminado emite rayos rectos de luz en todas direcciones, y es la hipótesis

principal de una teoría de la luz llamada óptica geométrica. (Beltrán L., 1992) La interacción de los rayos con algún lente y otro medio, se puede llegar a producir ciertos fenómenos, como la polarización, reflexión, refracción, transmisión, descritos brevemente en los siguientes temas y principalmente, los fenómenos de difracción e interferencia de la luz.

2.2. Propiedades y fenómenos de la luz

2.2.1. Polarización

La polarización electromagnética es un fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas como la luz, ya que el campo eléctrico y el campo magnético son oscilantes, pero en diferentes direcciones; ambas perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, por el cual el campo eléctrico oscila sólo en un plano determinado, denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores, uno de ellos paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección el cual indica la dirección del campo eléctrico.

En una onda electromagnética no polarizada, al igual que en cualquier otro tipo de onda transversal sin polarizar, el campo eléctrico oscila en todas las direcciones normales a la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales, como las ondas sonoras, no pueden ser polarizadas porque su oscilación se produce en la misma dirección que su propagación. (Valenzuela, 2012)

En la Figura 2.5 se representa una onda transversal. Para obtener luz polarizada linealmente se hace que el vector eléctrico vibre en un único plano (plano de polarización) de los que contienen la dirección de propagación.

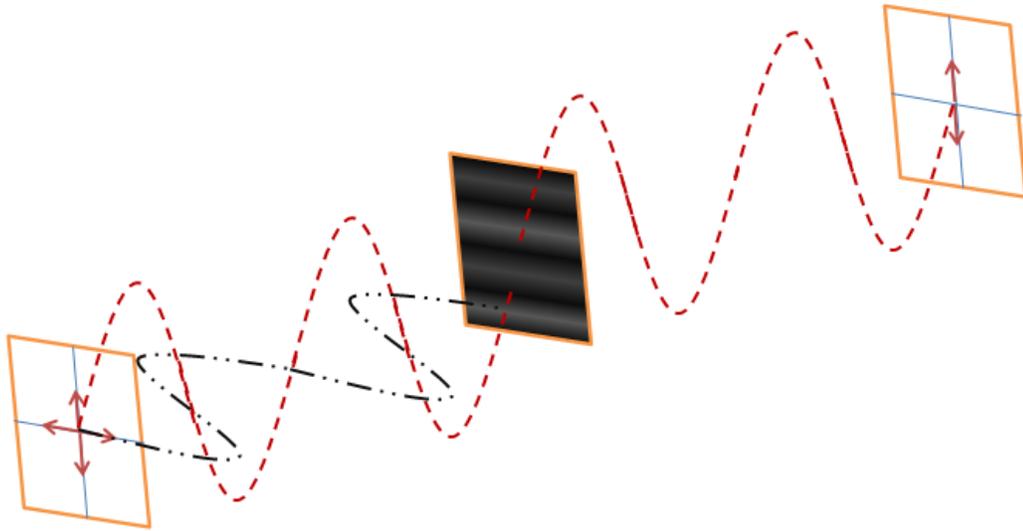


Figura 2.5 Polarización de una onda transversal

2.2.2. Refracción

Cuando una onda plana incide en un límite entre dos medios homogéneos de diferentes índices de refracción, que se divide en dos ondas: una onda transmitida y una onda reflejada (Born & Wolf, 1970). El viaje de la onda transmitida en el segundo medio explica el fenómeno de refracción. Cuando la luz es refractada, cambia de dirección puesto que la velocidad de su desplazamiento se ha alterado también. En la Figura 2.6 podemos observar un diagrama de este fenómeno de dos medios distintos (e.g. aire y cristal). La normal es la recta perpendicular imaginaria de la superficie de un medio y otro. La onda incidente representada por el rayo a) es la que llega del primer medio a la normal. La onda transmitida descrita por el rayo b) es también llamada onda refractada, se forma una vez traspasado el segundo medio y es una parte de la energía de la onda incidente. La tercera onda que se genera es llamada onda reflejada simbolizada por el rayo c), la cual se propaga hacia atrás en el primer medio y es la otra parte de la energía de la onda incidente.

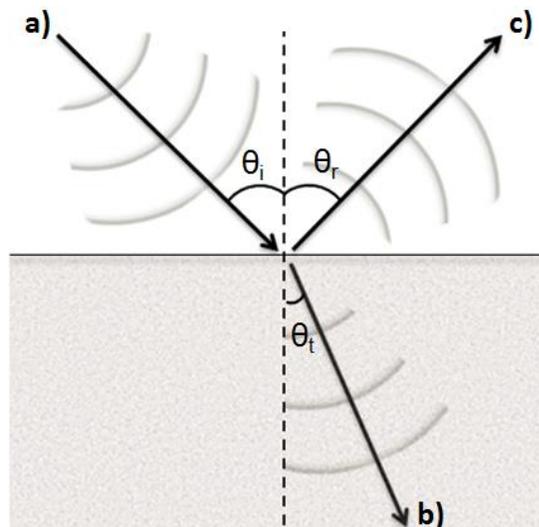


Figura 2.6 Propiedades de refracción y reflexión

2.2.2.1. Índice de refracción

El color, la intensidad y la dirección son demostraciones del comportamiento de la luz cuando cambia de un medio a otro. Cuando esto sucede, las ondas interactúan con los átomos del medio al que se incidió y que absorben y emiten radiación, proceso que retrasa la propagación de la luz y por ello la velocidad es menor que en el vacío. En el caso de que el material donde se propague la onda luminosa sea transparente, parte de ésta radiación es transmitida.

La velocidad de propagación depende del medio en donde se esté propagando, y cada material tiene un índice de refracción absoluto asignado a n , como se muestra en la ecuación 2.2. Se obtiene dividiendo la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en otro medio distinto. No tiene unidades.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.2)$$

n = Índice de refracción

c = Velocidad de la luz en el vacío = 300 000 Km/s

v = Velocidad de la luz en el medio Km/s

2.2.3. Reflexión

La reflexión es el fenómeno de la onda o rayo de luz al cambiar su dirección y rebota al chocar contra un obstáculo grande como se muestra en la Figura 2.6 en el inciso c.

Existen dos tipos: reflexión difusa que se origina cuando los rayos chocan con la superficie opaca, pero se dispersa en distintas direcciones a causa de que la superficie no está pulimentada. Debido a este tipo de reflexión, es posible percibir los objetos que son iluminados.

El otro tipo es la reflexión especular, y se da cuando los rayos de luz inciden en una superficie pulimentada, por ende estos rayos viajan en una sola dirección.

2.2.3.1. Leyes de Snell

Las leyes de Snell son leyes matemáticas para el análisis de la interacción de una onda con la superficie entre dos medios que dan lugar a los fenómenos reflexión y/o refracción. De acuerdo a la Figura 2.6, el ángulo θ_i pertenece al ángulo del rayo de incidencia, el ángulo θ_r es el rayo de reflexión y θ_t es el ángulo de la onda transmitida también llamado refracción.

En las leyes de Snell, la ecuación que aplica para la reflexión es:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.3)$$

Y para la ley de refracción aplica:

$$\frac{\sin \theta_i}{v_1} = \frac{\sin \theta_t}{v_2} \quad (2.4)$$

Donde v_1 es la velocidad de la luz en el primer medio y v_2 es la velocidad de la luz en el segundo medio.

2.2.4. Difracción

La difracción es un fenómeno ondulatorio que se produce cuando la onda se expande al pasar cerca del borde de algún obstáculo o una abertura estrecha en lugar de pasar en línea recta, ya que el movimiento rectilíneo de una onda es el único que era considerado en la naturaleza de la luz.

Cuando un haz de luz interactúa con los bordes de un objeto o atraviesa una abertura, la perturbación resultante se debe a las contribuciones infinitesimales de las diferentes partes del frente de onda cada una con una fase y una amplitud infinitesimal correspondiente. (Carreño, 2001)

En la Figura 2.7 se representa a un frente de onda plano que se extiende y después de atravesar por una rendija estrecha se forma un frente de onda circular. Este fenómeno solo se observa si el obstáculo con el cual choca la onda es del mismo orden que la longitud de la onda del movimiento, ya que si es mayor, las ondas siguen su propagación rectilínea. La expansión de la luz por difracción produce una borrosidad que limita la capacidad de aumento útil de un microscopio o telescopio.

Cuando una luz de una fuente puntual atraviesa una apertura circular pequeña, esta no produce un punto brillante, sino más bien un disco difuso circular conocido como disco de Airy, rodeado de anillos circulares concéntricos mucho más tenues (Carreño, 2001).

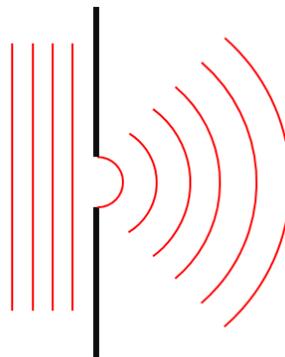


Figura 2.7 Difracción a través de una rendija estrecha

2.2.5. Interferencia

Uno de los ejemplos más representativos de interferencia son los colores en las burbujas de jabón. Las franjas se deben a la interferencia producida por la luz reflejada en las superficies superior e inferior de la película (Tipler, 1993) Esto se debe a que existen variaciones en el espesor de la película jabonosa. La luz que proviene de las fuentes que están en nuestro entorno no puede ser utilizada para representar el fenómeno de la interferencia, condicionalmente se necesita que la luz sea coherente.

Desde el punto de vista de la física, se define a la interferencia como la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante de la suma de las irradiancias componentes.

Cuando se produce interferencia, la irradiancia resultante forma un patrón de franjas llamadas órdenes interferenciales, que es el número de veces que se repite la diferencia de camino óptico de la longitud de onda. El camino óptico es la distancia que recorre la luz en un medio, en el tiempo que se toma en recorrer el camino geométrico.

Los interferómetros son aparatos ópticos que, con diversos métodos, aprovechan el fenómeno de interferencia de las radiaciones electromagnéticas como la luz, para diferentes tipos de medidas. Hay muchos tipos de interferómetros, en todos ellos se utilizan dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas, determinadas por un sistema de espejos y placas que, finalmente, convergen para formar un patrón de interferencia.

Los interferómetros se clasifican en dos grupos según la forma en que producen las fuentes secundarias: división de frente de onda y división de amplitud. En el primer caso, se usan porciones del frente de onda primario, bien sea directamente como fuentes secundarias virtuales o en combinación con otros dispositivos ópticos. El experimento de Young es un buen ejemplo de interferencias por división del frente de onda. En el segundo caso, el haz primario se divide en dos haces secundarios, los cuales viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir. El interferómetro de Michelson es

un claro ejemplo, que consiste básicamente en una fuente láser, la cual, al encontrarse un divisor de haz, es separada en dos frentes de onda idénticos, propagándose en direcciones perpendiculares. Estos haces se reflejan en espejos planos, volviéndose a recombinar tras el divisor de haz. (Rodríguez García, Virgós, & Virgós Rovira, 1999)

2.2.5.1. Condiciones generales

La intensidad del campo eléctrico E producida por los campos separados E_1 y E_2 , cada campo originado por fuentes coherentes, podemos representarlo por la ecuación:

$$E = E_1 + E_2 \quad (2.5)$$

La amplitud del campo eléctrico E varía en el tiempo, a una frecuencia en un rango aproximado entre $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ y $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Como se puede observar, los cambios en la amplitud son muy difíciles de detectar.

Se define a la Irradiancia como una medida de concentración de la potencia incidente por unidad de superficie de cualquier tipo de radiación electromagnética. Es equivalente a la energía media por unidad de área por unidad de tiempo. (Hecht, 2000)

La irradiancia puede ser medida por distintos sensores como emulsiones fotográficas, entre otros dispositivos. Este aspecto facilita el estudio de la interferencia por medio de la irradiancia.

La irradiancia es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, representado por:

$$I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle_T$$

Siendo ϵ_0 la permitividad de un material, c la velocidad de propagación y T el periodo.

Considerando un medio isótropo, homogéneo y lineal, la expresión de la irradiancia es:

$$I = \langle E^2 \rangle_T \quad (2.6)$$

Teniendo en cuenta que:

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

$$E^2 = E \cdot E$$

Pudiéndose representar de forma más explícita:

$$E^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)$$

Y multiplicando los términos queda:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2) \quad (2.7)$$

Si $I = E^2$, se sustituyen las variables quedando:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.8)$$

Siempre que se cumpla

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle_T \quad (2.9)$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle_T \quad (2.10)$$

y

$$I_{12} = 2 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle_T \quad (2.11)$$

Donde $I_{12} = 2(E_1 \cdot E_2)$ y es denominado término de interferencia.

Considerando a E_1 y E_2 como dos fuentes puntuales llamadas S_1 y S_2 que son ondas linealmente polarizadas, monocromáticas, con la misma frecuencia, y en un medio homogéneo, que se pueden representar de la forma:

$$E_1 = E_{01} \cos (K_1 r - \omega t + \varepsilon_1) \quad (2.12a)$$

$$E_2 = E_{02} \cos (K_2 r - \omega t + \varepsilon_2) \quad (2.12b)$$

Y sustituyendo los términos en la Ecuación (2.11) queda

$$I_{12} = 2E_1 \cdot E_2 = 2[E_{01} \cdot E_{02}][\cos (K_1 r - \omega t + \varepsilon_1) \cos (K_2 r - \omega t + \varepsilon_2)]$$

Se aplican algunas operaciones, principalmente en la expresión $E_1 \cdot E_2$, en este caso la identidad trigonométrica para separar los términos:

$$E_1 \cdot E_2 = (E_{01} \cdot E_{02}) \{[\cos (K_1 r + \varepsilon_1) \cos \omega t + \sin(K_1 r + \varepsilon_1) \sin \omega t] \\ \cdot [\cos (K_2 r + \varepsilon_2) \cos \omega t + \sin(K_2 r + \varepsilon_2) \sin \omega t]\}$$

Multiplicando

$$E_1 \cdot E_2 = (E_{01} \cdot E_{02}) [\cos (K_1 r + \varepsilon_1) \cos (K_2 r + \varepsilon_2) \cos^2 \omega t \\ + \cos (K_1 r + \varepsilon_1) \sin(K_2 r + \varepsilon_2) \cos \omega t \sin \omega t \\ + \cos (K_2 r + \varepsilon_2) \sin(K_1 r + \varepsilon_1) \cos \omega t \sin \omega t \\ + \sin(K_1 r + \varepsilon_1) \sin(K_2 r + \varepsilon_2) \sin^2 \omega t]$$

Promediando nuestra función armónica y midiendo la energía radiante absorbida durante un intervalo finito de tiempo, consideramos a $\cos^2 \omega t = \frac{1}{2}$, $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}$ y $\cos \omega t \sin \omega t = 0$, por lo tanto queda:

$$E_1 \cdot E_2 = (E_{01} \cdot E_{02}) \left\{ \frac{1}{2} [\cos (K_1 r + \varepsilon_1) \cos (K_2 r + \varepsilon_2) + \sin(K_1 r + \varepsilon_1) \sin(K_2 r + \varepsilon_2)] \right\}$$

Y aplicando una identidad trigonométrica se reduce a:

$$E_1 \cdot E_2 = \frac{1}{2} [E_{01} \cdot E_{02} \cos (K_1 r + \varepsilon_1 - K_2 r - \varepsilon_2)]$$

Sustituyendo los términos en la Ecuación (2.11):

$$I_{12} = 2(E_1 \cdot E_2) = 2 \left\{ \frac{1}{2} [E_{01} \cdot E_{02} \cos (K_1 r + \varepsilon_1 - K_2 r - \varepsilon_2)] \right\}$$

Se considera que el argumento $(K_1 r + \varepsilon_1 - K_2 r - \varepsilon_2)$ es la diferencia de fase de longitud de camino y también debido a una diferencia del ángulo de desfase inicial, asignándolo a la variable δ .

Cuando consideramos que E_{01} es paralelo a E_{02} , el término de interferencia se representa con la ecuación:

$$I_{12} = E_{01} E_{02} \cos \delta \quad (2.13)$$

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

Si E_{01} y E_{02} son perpendiculares, al igual que E_1 y E_2 , entonces $I_{12} = 0$ e $I = I_1 + I_2$.

Se retoma la consideración de que E_{01} y E_{02} son paralelas, observamos las equivalencias de la Ecuación (2.11) de la irradiancia y percibiendo que:

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle_T = \frac{E_{01}^2}{2} \quad (2.14)$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle_T = \frac{E_{02}^2}{2} \quad (2.15)$$

Puesto que $E_1^2 = \cos^2(K_1 r + \varepsilon_1) \cos^2 \omega t + \sin^2(K_1 r + \varepsilon_1) \sin^2 \omega t$ y aplicando las identidades trigonométricas y las consideraciones que se tomaron para promediar la función armónica, la expresión se reduce a $\frac{E_{01}^2}{2}$

El término de interferencia queda:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.16)$$

Por ende, la irradiancia total es:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.17)$$

2.2.5.1.1. Interferencia Constructiva e Interferencia Destructiva

La irradiancia puede ser mayor, menor o igual a $I_1 + I_2$, dependiendo del valor de la fase δ . Por ejemplo, un máximo de la irradiancia se representa cuando $\cos \delta = 1$, sí que se puede considerar que el valor de la irradiancia permanece como la forma original:

$$I_{m\acute{a}x} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.18)$$

Considerando el valor de la fase δ equivalente a $0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots$ o un múltiplo de 2π , se dice que existe interferencia constructiva total, ya que las ondas se encuentran en fase.

Cuando $0 < \cos \delta < 1$ las ondas se encuentran fuera de fase, sin embargo se cumple que $I_1 + I_2 < I < I_{m\acute{a}x}$ y el resultado se denomina interferencia constructiva.

Con la fase δ equivalente a $\pi/2$, el valor de $\cos \delta = 0$, o sea que las dos ondas están desfasadas entre sí a 90° e $I = I_1 + I_2$. Si $0 > \cos \delta > -1$ entonces resulta la interferencia destructiva, $I_1 + I_2 > I > I_{min}$. La irradiancia mínima se produce cuando las dos ondas están desfasadas a 180° , entonces las crestas de una de ellas se superpone con los valles de la otra, $\cos \delta = -1$ y

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.19)$$

Estimando el valor de la fase δ equivalente a $\pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots$ se dice que existe interferencia destructiva total, ya que las ondas se encuentran desfasadas entre sí.

El tercer caso que se puede dar por la interacción de estas dos ondas que se interfieren en el punto P, es cuando sus amplitudes son iguales ($E_{01} = E_{02}$). La irradiancia de las dos fuentes son iguales, cumpliéndose $I_1 = I_2 = I_0$. Así que, para este caso, la ecuación ** de irradiancia total puede escribirse como:

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta)$$

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2.20)$$

Donde $I_{min} = 0$ e $I_{m\acute{a}x} = 4I_0$.

Queda claro que esta última ecuación se aplica cuando la distancia entre S_1 y S_2 es tan pequeña en comparación de otras variables (como r_1 y r_2 que se definen en el análisis matemático del experimento de Young), también cuando la zona de interferencia es pequeña.

Si las fuentes E_{01} y E_{02} son de igual intensidad, $I_1 = I_2 = I_0$, entonces la fase queda representada como:

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} [k(r_1 - r_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]$$

Así que los máximos de irradiancia se producen cuando $\delta = 2\pi m$, cuando $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Los mínimos ocurren cuando $I = 0$ y $\delta = \pi n$, cuando $n = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$ o también $n = 2m + 1$.

Se concluye que la irradiancia máxima puede producirse cuando:

$$(r_1 - r_2) = [2\pi m + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]/k$$

Y la irradiancia mínima se produce cuando:

$$(r_1 - r_2) = [\pi n + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]/k$$

En el caso de que las ondas están en fase del emisor, entonces se reescriben la irradiancia máxima como:

$$(r_1 - r_2) = \frac{2\pi m}{k} = m\lambda \quad (2.21)$$

Y la irradiancia mínima como:

$$(r_1 - r_2) = \frac{\pi n}{k} = \frac{1}{2}n\lambda \quad (2.22)$$

La zona clara y oscura que se perciben en la región de interferencia se denomina franjas de interferencia (Hecht, 2000). La franja central brillante está en medio de las dos fuentes, se le denomina franja de orden cero ($m = 0$) y después le siguen las franjas oscuras que son los mínimos $n = \pm 1$, seguidos por el primer orden de franjas brillantes $m = \pm 1$, acortados por los mínimos $n = \pm 3$, y así sucesivamente, abarcando la región de interferencia.

2.2.5.2. Condiciones para interferencia

Para observar el fenómeno de interferencia, por ejemplo, en dos fuentes, tienen que cumplir con dos condiciones: la primera de ellas es que las fuentes de luz sean coherentes. Sin embargo, en nuestro entorno no contamos con fuentes que cumplan estas características, salvo el láser moderno. Cuando se habla de fuentes de luz coherente, se refiere a que éstas deben mantener una fase constante respecto de otra. La segunda condición que debe cumplir las fuentes es que sean monocromáticas entre sí, o sea, de aproximadas longitudes de onda (Serway & Jewett, 2009).

La coherencia se puede clasificar en dos tipos: coherencia espacial y coherencia temporal. La coherencia espacial se presenta cuando la diferencia de fase entre dos

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

puntos en el espacio es constante en el tiempo (Arieli, "The Laser Adventure", s.f.). La coherencia espacial define el orden de oscilación de dos puntos en un frente de onda.

La coherencia temporal que la luz tiene una longitud de onda única (o una frecuencia única). Esto significa que en un instante de tiempo, mientras que la onda avanza una distancia ésta mantiene su forma original (Arieli, "The Laser Adventure", s.f.).

2.3. Holografía

En el año 1947, el físico húngaro Dennis Gabor desarrolló la holografía, y a partir de esta investigación exhaustiva, recibió el premio Nobel en 1971. Gabor definió por primera vez la palabra “Holografía” que viene del griego “Holos” que significa completo (Hecht, 2000). Las grabaciones que obtenemos de éste proceso holográfico reciben el nombre de “Hologramas”.

El invento consiste en grabar imágenes tridimensionales, obteniendo información (amplitud y fase de un frente de onda), en el cual no se utiliza lente como en la fotografía bidimensional tradicional, ya que éstas últimas son sólo representaciones de imágenes y su irradiancia, a las cuales se acostumbra a percibir como tridimensional. La holografía es un proceso donde un frente de una onda electromagnética luminosa que previamente ha pasado en el objeto que se desea grabar, el cual en la primera etapa cumple con un proceso (que se mencionará más adelante) donde se modula y codifica, conservando su fase para su registro en un medio como películas sensibles, algún disco, etc. En una segunda etapa se usa ese registro para recuperar la información contenida, generalmente en forma de una imagen del objeto, el cual tiene efectos tridimensionales y de paralaje, éste último significa que se pueden observar distintas perspectivas de la imagen dependiendo del ángulo de punto de vista del observador.

Los hologramas que elaboró Gabor no fueron del todo eficaces, debido a que la luz que utilizaba para la interferencia no era suficientemente coherente, hasta la invención del láser en la década de 1960, más adelante hubo algunos avances en el área de la computación digital y se abrieron paso otras posibilidades para generar hologramas.

De acuerdo al método de Gabor, el primer paso es iluminar el objeto con una onda de luz coherente. Una parte considerable de la onda penetra a través de él. Un patrón de difracción llamado “Holograma”, que se forma por la interferencia de la onda secundaria derivada de la presencia del objeto con la onda de referencia, se registra en una placa fotográfica. Si la placa, adecuadamente procesada, se sustituye en la posición original y

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

es iluminado por la onda de referencia, la onda que se transmite por la placa contiene información sobre el objeto original, y esto se puede extraer de la fotografía de procesos ópticos. Con el fin de "reconstruir" el objeto de esta onda "sustituto", sólo es necesario enviar a través de un sistema de formación de imagen adecuado, y una imagen aparecerá en el conjugado plano al plano en el que se encuentra el objeto. Sólo se analizan los principios ópticos involucrados. (Born & Wolf, 1970)

Para el proceso de holografía de Gabor, hubo una necesidad de grabar tanto en amplitud y fase, pero en posesión de un dispositivo (placa fotográfica) que sólo registra la intensidad, ideó un sistema óptico en el que en la posición de la placa fotográfica casi toda la información residía en la magnitud de la amplitud, y poco en su fase. El método tuvo éxito, pero tuvo la desventaja de que muestra la reconstrucción siempre con la imagen adicional detrás de él, y sistema de iluminación desde la parte posterior por una fuente puntual (Smith & Thompson, 1971)

El método inventado por Leith y Upatnieks (1960) para hacer los hologramas consiste primeramente en la iluminación con el haz luminoso de un láser, del objeto cuya imagen se quiere registrar, y después se coloca una placa fotográfica en una posición tal que a ella llegue la luz tanto directa del láser, o reflejada en espejos planos, como la que se refleja en el objeto cuya imagen se desea registrar (Malacara, 1989).

Se analizan los hologramas como patrones de interferencia, y por ende, tienen las mismas limitaciones que la interferencia en dos haces, descritas en el experimento de Young:

- Solo pueden interferir haces con la misma polarización.
- Solo interfieren haces con igual frecuencia.

Los dos haces deben ser mutuamente coherentes entre sí, aunque en algunos casos se usa luz parcialmente coherente.

La grabación de un holograma consiste en la interferencia haciendo un arreglo de instrumentos ópticos de los que se describirán más adelante, para obtener una diferencia

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

de fase entre un haz del objeto tridimensional y un haz de referencia, ambos provenientes de la división de la luz, comúnmente de un láser. El haz que se refleja e ilumina el objeto es el que atraviesa una lente y crea la onda del objeto tridimensional como señal, y se proyecta en una placa bidimensional fotosensible. El haz de referencia es el que graba la amplitud y fase de la señal, atravesando una lente y llegando a un espejo, se refleja en la placa antes de pasar por otra lente; cuando los dos haces inciden juntos en la placa, se produce la interferencia en esta. Una vez producida la interferencia, se ha grabado la placa, y cuando ésta es iluminada con luz, que a cierta distancia aparece la imagen del objeto en tres dimensiones.

En la Figura 2.8 se muestra el proceso holográfico fuera de eje que desarrolló Gabor que muestra desde el láser hasta la placa de plata donde se grababan los hologramas.

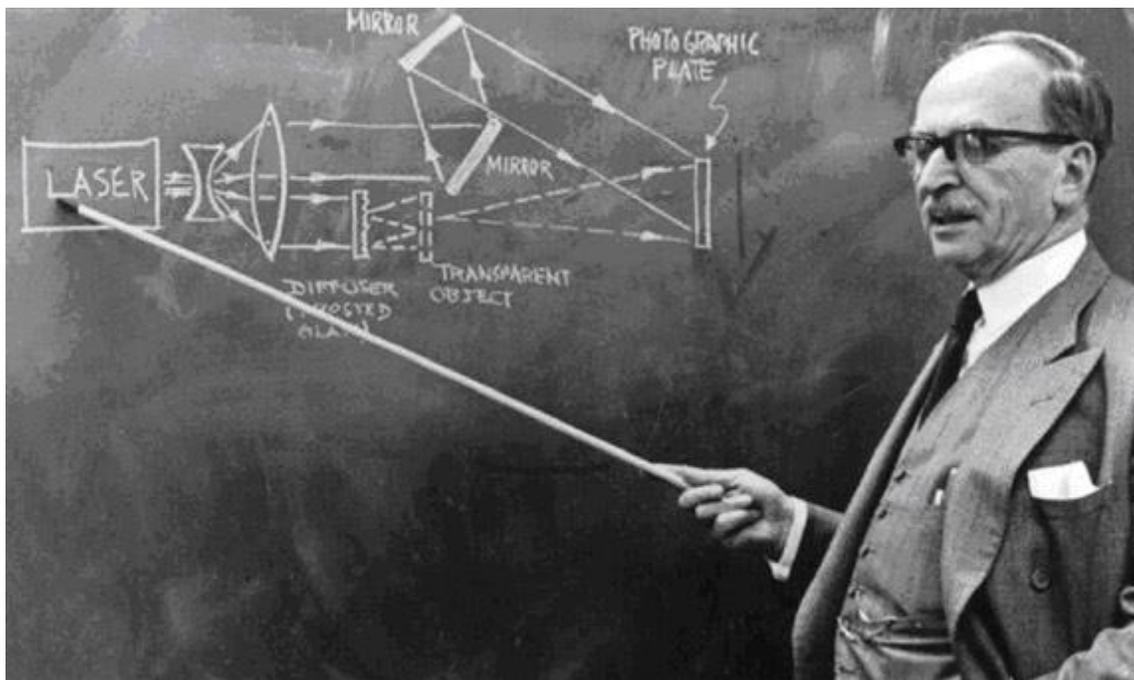


Figura 2.8 Dennis Gabor mostrando el registro de un holograma fuera de eje de un objeto transparente (Segrè, 1971)

2.4. Principios básicos de holografía: experimento de Young

En 1655 Grimaldi realizó un experimento en donde dejaba entrar luz en un cuarto oscuro a través de un pequeño orificio, y dedujo que en los puntos donde las ondas de luz se superponían, se obtendría oscuridad, pero no pudo demostrarlo. (Malacara, 1989)

Luego, en 1801, Thomas Young retomó ese experimento pero ahora el orificio pequeño de una primera placa era utilizada como fuente primaria y así logró darle más coherencia a la luz. La segunda placa tenía dos aperturas que funcionaban como fuentes secundarias. En una tercera placa se mostraba un patrón de luz singular, ya que obtuvo una respuesta de franjas, unas más brillantes y otras más oscuras entre sí. De esta forma pudo demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz con el fenómeno conocido como interferencia.

Hoy en día el experimento se puede aplicar con cierto número de rendijas, para este estudio sólo se analizarán las condiciones y resultados que se obtienen con 2 aperturas.

En la Figura 2.9 se muestra un esquema general del experimento de Young; utilizando una fuente de luz monocromática, se proporcionan ondas planas que pasan a través de una barrera que tiene dos ranuras paralelas, a las que se les nombrará S_1 y S_2 ; las cuales permitirán separar el haz de luz en dos partes, comportándose como fuentes puntuales de ondas esféricas con igual fase, suponiendo que es igual a cero. Las dos ranuras deben ser paralelas, considerablemente cercanas y angostas, al atravesar las ranuras, las ondas de luz se extienden y se superponen entre ellas, formando el fenómeno. Se percibe una onda senoidal, donde $m = \pm 1$ equivale a una diferencia de longitud de camino de una longitud de onda y al máximo de primer orden, y suponiendo por generalidad al índice del medio como 1. (Hecht, 2000)

La luz de S_1 y S_2 produce en un plano, una configuración de bandas brillantes y oscuras paralelas llamadas franjas, las cuales pueden ser observadas al colocar una pantalla en dicho plano (Serway & Jewett, 2009). Cuando las ondas inician en fase y se superponen

en un punto P a la misma distancia obtenemos una interferencia constructiva, representada por una onda de mayor amplitud; sin embargo, cuando las ondas inician en fase, ya que provienen de la misma fuente de luz monocromática, pero uno de los haces tiene que recorrer una distancia mayor que la otra onda, obtendremos interferencia destructiva, representada por una onda de menor amplitud o la anulación entre estas.

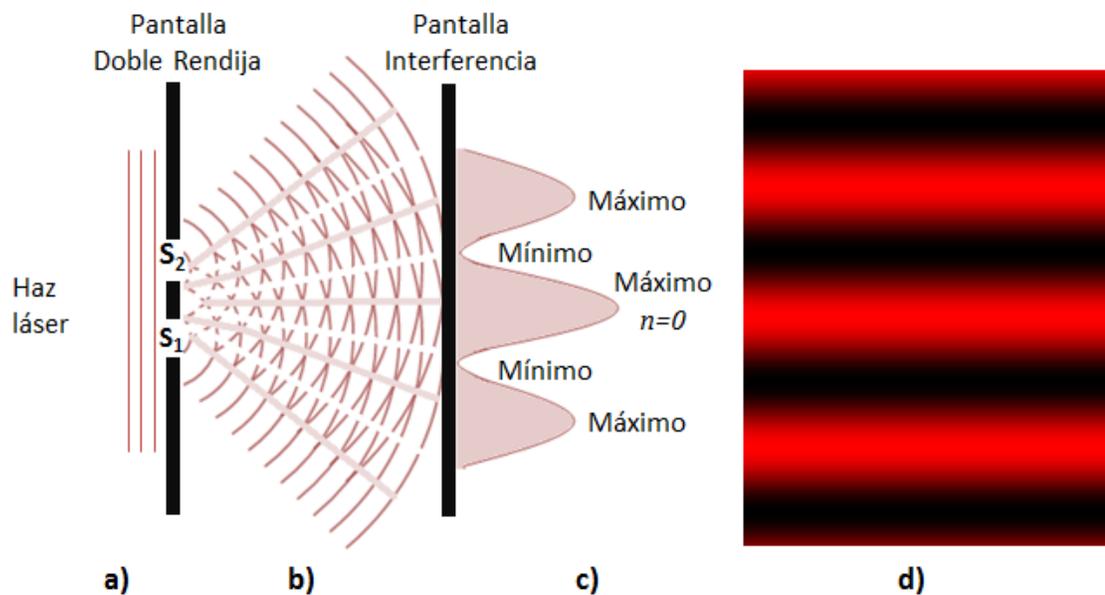


Figura 2.9 Representación de la interferencia de dos haces por el experimento de Young

En la Figura 2.10, se indica más a detalle el modelo geométrico del experimento de Young, donde la longitud de onda está representada por el símbolo λ , las rendijas S_1 y S_2 se encuentran paralelamente una de la otra, Σ_α es el plano donde se encuentran las rendijas y Σ_0 el plano donde se proyectará la interferencia, a es la distancia que hay entre las rendijas S_1 y S_2 que generalmente están muy juntas, S es la distancia entre Σ_0 y Σ_α , P es el punto donde S_1 y S_2 se superponen, O es el centro de la pantalla Σ_0 , el ángulo θ_m tiende a aumentar cuando el punto P se aleja del centro de la pantalla O , la variable Y_m es la distancia entre O y P . De acuerdo a la figura referenciada:

- Ondas planas provenientes de una fuente de luz coherente.
- Las ondas traspasan las dos rendijas y se forman dos haces luminosos de ondas esféricas.
- Representación simétrica de interferencia de acuerdo a sus máximos y mínimos.
- Franjas intensas y franjas oscuras.

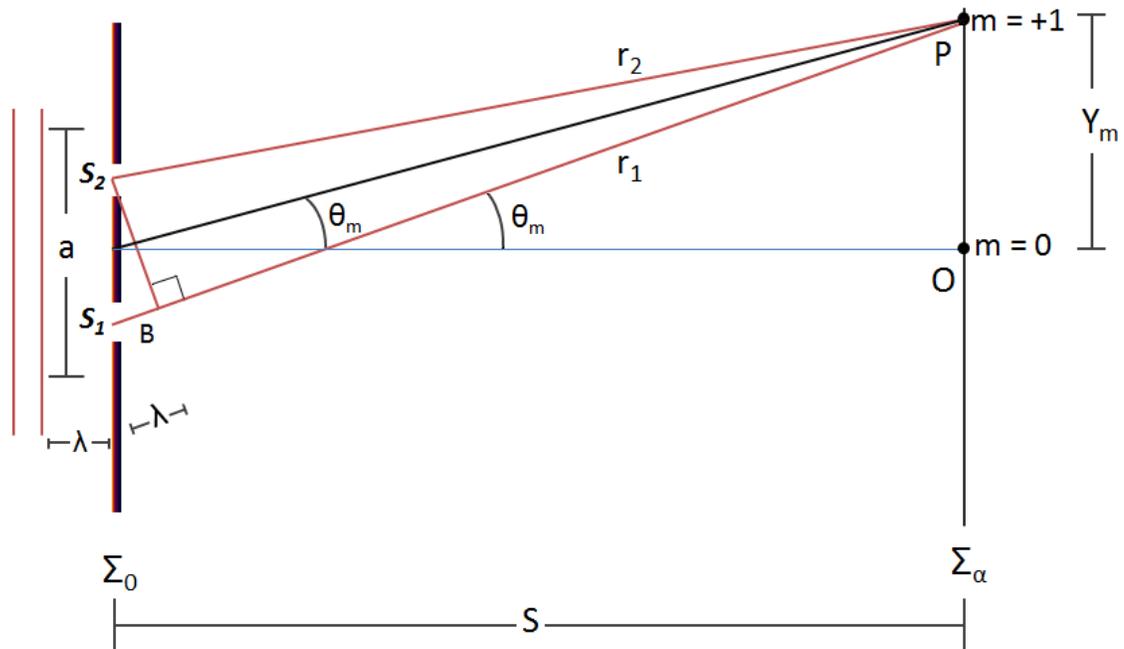


Figura 2.10 Óptica geométrica del experimento de Young

Analizando el diseño geométrico, se deduce que para lograr percibir interferencia se necesitan ciertas condiciones: una vez que el láser de luz coherente incide sobre la pantalla Σ_0 , las variables S_1 y S_2 actúan como fuentes puntuales de acuerdo al principio de Huygens mencionado anteriormente. Se compara la distancia a con la distancia S y se observa una diferencia notablemente grande, y las franjas aproximadas a O .

La diferencia de camino óptico se da a partir de:

$$\overline{S_1B} = \overline{S_1P} - \overline{S_2P} \quad (2.23)$$

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

donde la diferencia entre $\overline{S_1P}$ y $\overline{S_2P}$ es equivalente a la perpendicular que va de S_2 a S_1P

Además $r_1 = S_1P$ y $r_2 = S_2P$, entonces:

$$\overline{S_1B} = r_1 - r_2$$

Observamos que para obtener el valor de $\overline{S_1B}$ se puede considerar como el cateto opuesto de un triángulo que se forma con S_1 , S_2 y B , obtenemos:

$$\overline{S_1B} = a \sin \theta$$

Se puede notar que θ es un ángulo muy pequeño a comparación de las demás distancias, por ende se considera:

$$\sin \theta \approx \theta$$

podemos considerar a $\theta \approx \frac{Y}{S}$

Entonces las expresiones se han reducido a:

$$\overline{S_1B} = a\theta = a \frac{Y_m}{S} = r_1 - r_2$$

Retomando la ecuación (2.21) se observa que:

$$r_1 - r_2 \approx m\lambda$$

Así que:

$$m\lambda \approx a \frac{Y_m}{S}$$

$$Y_m \approx \frac{S}{a} m\lambda$$

Y la posición angular de las franjas es:

$$\theta = \frac{m\lambda}{a}$$

2.5. Metodología para grabación y recuperación de hologramas

La grabación de un holograma consiste en producir un patrón de interferencia y grabarlo en un medio de registro. Para producir un patrón de interferencia es necesario hacer uso de distintos instrumentos ópticos utilizados en la grabación de un holograma, del cual se hace una descripción general.

El láser es un dispositivo de luz coherente espacial y temporalmente. La luz puede ser amplificada en su transmisión a través de un medio por el proceso de emisión estimulada, en el que la energía almacenada en el medio se libera por la radiación de luz (Smith & Thompson, 1971). Para el proceso holográfico se utilizan generalmente láseres de distintas características como la potencia de salida, la longitud de onda que emite y otros criterios. Algunos de ellos son los láseres continuos como el láser Helio-Neón (He-Ne) de tipo gaseoso-atómico con una longitud de onda $\lambda = 633\text{nm}$ y una potencia de salida entre 0.5mW a 100mW. Existen también los láseres de pulsos que se usan para procesos de grandes escenas y con gran velocidad.

Durante el proceso holográfico debe haber una estabilidad en sus elementos que forman parte de éste, principalmente si se utilizan láseres continuos debida a que su tiempo de exposición es más largo. Para cumplir este propósito existen mesas anti vibratorias de alta rigidez que no son tan susceptibles a las vibraciones exteriores porque se atenúan considerablemente.

En el esquema de la Representación de un método para exposición y reconstrucción de un holograma Figura 2.11, se muestra en el inciso a, el proceso de grabación, que consiste en la interferencia de dos frentes de onda, provenientes del mismo láser; una parte funciona como frente de onda de referencia y se refleja en un espejo plano, nótese que el espejo le da dirección hacia la placa fotográfica. El otro frente de onda es reflejado al objeto que se desea grabar y produce frentes de ondas modificadas con nueva información (ondas secundarias), que inciden en la placa fotográfica. La

interferencia de estos dos frentes de onda que provienen de la misma fuente pero tomaron distintos caminos, produce un holograma.

En el inciso b se observa la recuperación de la imagen que se encuentra en el holograma, haciendo que incida un haz de luz con la misma longitud de onda con la que fue grabado, como en este caso un láser, al reverso de la placa y del otro lado el observador puede distinguir la imagen tridimensional del objeto.

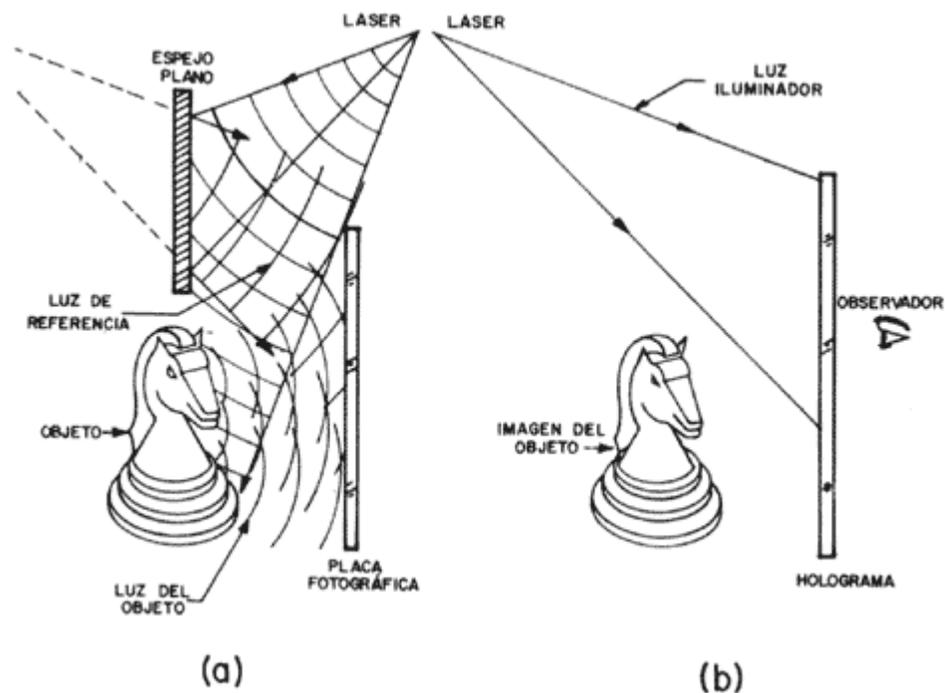


Figura 2.11 Representación de un método para exposición y reconstrucción de un holograma (Malacara, 1989).

Dependiendo de las técnicas utilizadas para el grabado, es la posición de los elementos que se necesitan para el grabado y recuperación de un holograma,

La grabación de un holograma es la parte del proceso donde se genera el patrón de interferencia y se graba en un medio. Cuando la grabación es de holografía tradicional, y

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

se utiliza una placa holográfica para el registro, se requiere de un proceso secundario de revelado.

En el caso de la holografía digital, en vez de la placa, se utiliza un sensor de carga acoplada CCD y así la información pasa directamente a la computadora para ser manipulada. A la par se utilizan simulaciones matemáticas para modelar los frentes de onda, en el cual se crea el patrón de interferencia para ser ejecutado en algún medio electrónico.

En la reconstrucción holográfica tradicional, para recuperar la información que se ha registrado previamente, por lo general se ilumina el holograma que fue revelado con un haz de luz similar, aproximadamente de la misma longitud de onda al haz de referencia que se usó en el proceso de grabación, llamado haz de iluminación y es el conjugado del haz de referencia para recuperar la información y se propaga en sentido contrario al holograma como se muestra en la Figura 2.11.

En la reconstrucción de holografía digital, una vez que el holograma ha sido digitalizado se introduce como datos a la computadora, después le aplican una simulación diseñada con modelos matemáticos de la propagación de luz.

Los hologramas se pueden clasificar de distintas maneras: por amplitud o por fase; dependiendo de la distancia que se coloque el medio de registro; dependiendo del ángulo que hay entre el haz de referencia y el haz de objeto; y por último, el medio donde es grabado.

2.6. Aplicaciones de la holografía

La holografía se puede aplicar a distintas áreas. Una de las más representativas es cuando se generan imágenes de objetos, la grabación de imágenes de piezas arqueológicas, o imágenes médicas tridimensionales e incluso de personas. Por lo general, en el medio interactivo usan proyectores y animaciones 3D giratorias o secuencias de video especiales como Cheoptics 360, donde el principio de generación de imágenes en base a reflexiones de espejo, la pantalla y el sistema reproductor está encerrado dentro de un soporte de exhibición compacta. (Fractal Systems)

Las aplicaciones más importantes de la holografía están destinadas al uso como elementos de seguridad y almacenamiento holográfico, como se mencionan a continuación.

2.6.1. Seguridad

Los hologramas como un dispositivo de seguridad han sido más utilizados en los billetes de distintos países como hologramas de relieve. Aunque en sus inicios, tuvo algunos obstáculos para su crecimiento en el mercado porque hubo un periodo donde se dudaba de su originalidad y se pensaba que podrían ser sencillo falsificarlos. Sin embargo, en la actualidad todavía permanecen en este rubro, incluso se utilizan como una característica distintiva en productos de marca. La tecnología para su fabricación sigue desarrollándose cada día más con la aplicación de múltiples variables ópticas que son utilizadas para su elaboración.

2.6.2. Almacenamiento holográfico

El almacenamiento holográfico consiste en guardar información, basado en grabar determinados bits mediante cambios magnéticos y ópticos en la superficie de los dispositivos y en un futuro con el desarrollo de nuevas tecnologías se puedan desarrollar complementando a las ya existentes memorias de estado sólido. Además se utiliza como un dispositivo de seguridad, ya que existen los hologramas prensados que son difíciles de reproducir y por ende casi son infalsificables (Malacara, 1989).

La holografía en el almacenamiento de datos tiene ventajas, y desventajas. Cada vez se necesitan tecnologías con mayor capacidad y velocidad aplicadas a distintos dispositivos. Las tecnologías convencionales son las memorias de semiconductores, así como los discos ópticos, discos y cintas magnéticas. Sin embargo, éstas se aproximan a sus límites físicos además de que se comprimen y se descomprimen los datos, lo cual representa una desventaja en los procesos donde se maneja la información.

El almacenamiento holográfico, el cual está en proceso de desarrollo paralelo a otras tecnologías y representa una alternativa de almacenamiento, consiste en almacenar múltiples imágenes en el mismo espacio, en el cual se guardan datos de forma binaria que se escriben como “puntos”, algunos claros y otros oscuros. La grabación se realiza en páginas bidimensionales dentro de un material fotosensible, como los cristales de un compuesto químico llamado estroncio-bario-niobato que son los más utilizados como soporte de grabación, ya que combinan una alta sensibilidad con alta velocidad (Soussan, 2004). Cuando las páginas se apilan una sobre otra se forma el volumen.

La ventaja de almacenamiento holográfico de datos reside en la capacidad del medio para almacenar y para permitir la recuperación de múltiples páginas de datos al mismo tiempo. El cambio más pequeño en la longitud de onda del haz de referencia produce un patrón de interferencia diferente. Por lo tanto, variando el ángulo de incidencia del haz de referencia, los científicos son capaces de grabar muchas páginas de datos diferentes en el mismo volumen de material. Los formatos de página se solapan también permiten una rápida velocidad de transferencia. La propiedad multiplexación de almacenamiento

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

holográfico de datos es lo que cuenta con expertos y científicos se sienten optimistas acerca de las tecnologías holográficas. En 2001, InPhase Tecnologías de Lucent han colaborado con Imation Enterprise para desarrollar placas holográficas con el potencial de almacenar 125 GB de datos en un disco de 5,25 pulgadas extraíble, con velocidades de lectura superiores a 30M bps. (Diallo, 2005)

2.7. Nuevas tecnologías aplicadas a la holografía

Desde la aparición del láser en los 60's, y los hologramas a color en los 80's, la holografía ha ido evolucionando con el desarrollo de nuevas herramientas y sus métodos de grabado.

En la actualidad uno de los avances más notables es la elaboración de hologramas Generados por Computadora (CGH por sus siglas en inglés) son elementos de difracción-ópticos que ofrecen la posibilidad de crear sistemas de visualización de onda de luz que se encuentran completamente bajo el control de la computadora (Dallas, 2006). Los CGHs producen frentes de onda con amplitud y distribución de fase diseñadas. Con el desarrollo de software científico y la ayuda de algoritmos de transformadas discretas de Fourier o de Fresnel facilitan el diseño de CGH's. El proceso de grabación generado por computadora, implica el elemento difractivo que es ejecutado metódicamente con la ayuda de una computadora. El paso de reconstrucción se maneja de la misma forma como en la holografía óptica tradicional. El procedimiento inicia definiendo la forma de un objeto determinado utilizando la fase y la amplitud de su onda y mediante un proceso de difracción inversa se calcula la amplitud compleja que se graba posteriormente en forma codificada en el holograma (Martínez P. & et).

Los CGH tienen dos clasificaciones: células orientadas y puntos orientados. Las dos se diferencian en los recursos que utilizan en el cálculo y trazado o impresión. El recurso computacional más importante es el tamaño de la transformada discreta de Fourier que se utiliza en el cálculo de la propagación de ondas. El segundo recurso es el dispositivo de grabación: la impresora o trazador junto con el medio final en la que la información del CGH es codificada (Dallas, 2006).

El Modulador de Luz Espacial (SLM por sus siglas en inglés) es el dispositivo que traduce los datos, transformándolos en una selección de píxeles en blanco y negro. El rayo señal saca una instantánea de esta imagen, después el ángulo de la luz láser se mueve mientras el SLM presenta la siguiente imagen en microsegundos.

Capítulo 2: Antecedentes y definiciones de holografía

Un nuevo tipo de dispositivo de memoria basado en la interferencia de las ondas de giro se ha dado a conocer por los científicos en los EE.UU. y Rusia. Los datos se almacenan en forma de bits magnéticos y se leen simultáneamente como imágenes holográficas. Debido a que las longitudes de onda de las ondas de giro son mucho más cortos que los de la luz, la densidad de almacenamiento de la memoria tiene el potencial de ser mucho mayor que los sistemas basados en hologramas ópticos, y algún día se podría utilizar para almacenar grandes cantidades de información. Sin embargo, las densidades de almacenamiento que se pueden lograr utilizando hologramas ópticos están limitados por los relativamente largas longitudes de onda de luz visible. (Johnston, 2014).

Capítulo 3:

Arreglo interferométrico de Young

En este capítulo se documenta los procedimientos que se realizaron para montar el experimento de Young con equipo de Newport, además de describir un programa en MATLAB que simula la interferencia entre dos haces de luz.

Capítulo 3 Arreglo interferométrico de Young

3.1. Experimento de Young armado con equipo de Newport

Los fundamentos del arreglo experimental se encuentran en el capítulo 2 en el tema “Principios básicos de holografía: Interferómetro de Young”, donde de una fuente de luz monocromática y coherente que produce ondas primarias, en este caso un láser que cumple con estas características, inciden en una pantalla con dos aberturas específicas, que funcionan como fuentes puntuales formando los frentes de ondas secundarias como dos haces de luz a una distancia a que hacen interferencia y se proyectan en una pantalla donde se perciben los patrones de difracción.

Un patrón de difracción es la imagen proyectada en nuestra pantalla, resultado del fenómeno de difracción de las ondas al atravesar las aperturas.

3.1.1. Equipo para armar el interferómetro de Young

Para armar el interferómetro de Young fue necesario implementar un equipo de Newport con componentes más precisos, como se muestra en el anexo titulado “Datos generales del equipo de Newport”

Láser

La fuente de luz primaria que se usa es el láser, por ser monocromática y coherente, y tiene ciertas especificaciones que son:

Láser Helio-Neón

Potencia: 1.5mW

Longitud de onda: 633nm



Figura 3.1 Conjunto del láser de Newport (Newport Corporation)

3.1.1. Armado del interferómetro de Young con Newport



Figura 3.2 Diagrama del experimento de Young

El arreglo propuesto para el experimento de Young se diseñó de acuerdo al orden como se muestra en la Figura 3.2.

El significado en inglés de siglas del diagrama que se muestra en diagrama de la **¡Error!** No se encuentra el origen de la referencia. son:

L: Laser (Láser)

I: Iris Assembly (Iris)

MS: Steering Mirror Assembly (Espejo de dirección)

BE: Beam Expander Assembly (Expansor de haz.)

OS: Openings Screen (Pantalla de aperturas)

Se muestra a continuación un esquema del experimento de Young que fue montado en el laboratorio.

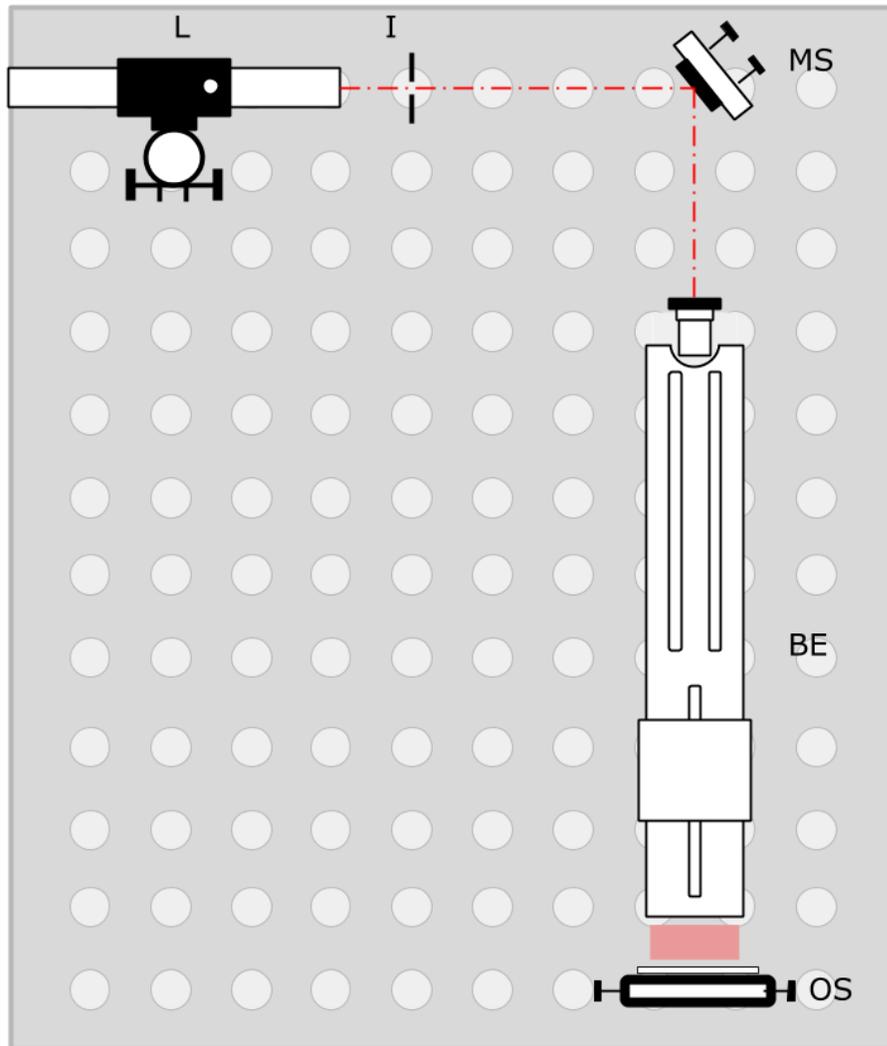


Figura 3.3 Representación del experimento de Young con el equipo de Newport

3.1.1.1. Recomendaciones generales para la instalación del experimento de Young con el equipo de Newport

La tabla óptica y algunos componentes tienen orificios dispuestos para acoplar un componente a otro con tornillos: para ello se emplean tornillos de cabeza hueca, tornillos de fijación, tuercas y arandelas de acero con recubrimiento de óxido negro, que vienen en los kits SK-08A y SK-25A de Newport Corporation y dependiendo del orificio, se elige alguno de los dos tipos de roscas y de la longitud conveniente, así que se debe verificar el tamaño adecuado para cada uso.

Para la colocación de tornillos y otros componentes se deben utilizar algunos destornilladores hexagonales que se acoplen al diámetro de la cabeza del tornillo.

Los tornillos de fijación y las tuercas no deben de apretarse de más, esto podría maltratar los elementos.

Cuando se hace manipulación del espejo, u otros componentes de uso auxiliar como vidrios o lentes, se recomienda manipularlos de manera cuidadosa, incluso utilizar guantes.

Para optimizar más espacio, se ha acomodado el experimento en la tabla óptica como se muestra en la Figura 3.3, el láser que es nuestra fuente de luz monocromática, después el Iris que sirve para verificar que el haz se encuentre alineado en todo el proceso, en la trayectoria del haz se coloca el espejo para darle una dirección de 90° , el expansor del haz para colimarlo, la pantalla que contiene las aperturas a analizar, y por último, la pantalla donde se produce la interferencia, todo ello con el proceso descrito a continuación:

1. Colocación de la tabla óptica

Se sitúa la tabla óptica RG-23-4 en una superficie plana y estable. Esto con el fin de que el experimento no sufra variaciones mientras se obtienen los resultados del proceso y se capturan las fotografías de difracción e interferencia. Se verifica que hay suficiente

espacio cerca de la tabla para colocar las unidades de fuente de alimentación y otros artículos que no sean parte del experimento.

2. Montaje de Láser a la tabla óptica

El láser es la fuente de luz que cumple con las características para generar y percibir la interferencia del experimento. Para ello debe estar bien ajustado de manera que no se mueva en todo el proceso del experimento.

Montar la barra 40 en la esquina de la tabla óptica ubicado en la posición como lo muestra la Figura 3.3. Se une la montura del láser ULM-TILT a la abrazadera 340-RC. Después, deslizar sobre la barra 40 la abrazadera 340-RC. Acoplar el láser R-30025 a la montura ULM-TILT, de manera que el láser esté posicionado dentro de la tabla, y alinearlos de modo que el plano de polarización sea perpendicular a la superficie de la tabla. (Polarización “S”).

Se debe ensamblar correctamente la fuente de alimentación como lo indica en el manual, y conectarse al láser, para encender el conjunto con el conector y las llaves. Se logra percibir el haz de luz monocromático que ayuda a calibrar la posición de los demás conjuntos.

3. Alineación del haz del láser

La alineación del láser es importante, puesto que permite tener el haz de luz a una altura aproximadamente igual desde que se emite desde la fuente hasta la pantalla donde se percibe la difracción e interferencia, además de que esté bien posicionado en el eje horizontal, y esté lo más centrado posible a todos los componentes del experimento.

Para esto, se coloca el montaje del iris frente al cabezal láser, sujetándolo a un orificio de la tabla con el tornillo adecuado, localizando el iris a la altura más conveniente; en este experimento se situó aproximadamente 6” o 15cm. Después ajustar la inclinación del láser y su posición vertical de tal manera que el haz pase sin problemas por la apertura del iris. Luego, colocar el iris casi al borde de la mesa de tal manera que la dirección del haz del láser apunte hacia el iris y pase por la apertura, para esto tal vez se

tendrá que ajustar de nuevo la posición del láser. Se puede comprobar la alineación del láser colocando el iris en cualquier distancia siguiendo la dirección del haz del láser dentro de la tabla óptica y como resultado el haz deberá tener la misma altura, ya que debe ser paralelo a la superficie de la mesa.

4. Espejo para direccionar el haz

El espejo sirve para direccionar el haz a un ángulo aproximado de 90° , esto con el fin de que el experimento no sea completamente lineal y ocupe mucho espacio en la tabla óptica.

Se debe armar paso a paso, primero, sujetando el riel portador plano MCF al riel óptico MRL-3; el conjunto será sujetado con tornillos del tipo de rosca correspondiente a la esquina lateral derecha en un ángulo aproximado como se muestra en la Figura 3.3. Después, sujetar con un tornillo el soporte para poste VPH-3 al riel MCF. Luego, colocar el poste SP-3 dentro del soporte VHP-3.

El poste SP-3 se une a la montura para espejo P100-P con un tornillo del tipo de rosca que corresponda, de tal manera que pueda acoplarse. Por consiguiente, se coloca y se ajusta el soporte para espejo UPA1. Luego, colocar cuidadosamente el espejo 10D20ER.1 al soporte del espejo UPA1, de manera que el espejo no se ensucie o maltrate.

Asegurándose que el conjunto esté bien instalado, ajustar el poste SP-3 que se encuentra dentro del soporte VHP-3 de manera que se encuentre a la altura necesaria.

5. Posicionamiento del expansor de haz

El expansor de haz consta de dos principales componentes: uno de ellos es el objetivo de microscopio y el otro es el lente de colimación. El objetivo de microscopio otorga la imagen del punto del haz del láser aumentada y nítida.

El haz tiende a divergir conforme la distancia es mayor desde el láser hasta el punto en donde se refleje. El módulo colimador sirve para convertir nuestro haz de luz en ondas

planas, esto quiere decir que al pasar por el módulo, el haz no converge ni diverge, y el punto del haz tiene el mismo tamaño a distintas distancias a partir del módulo.

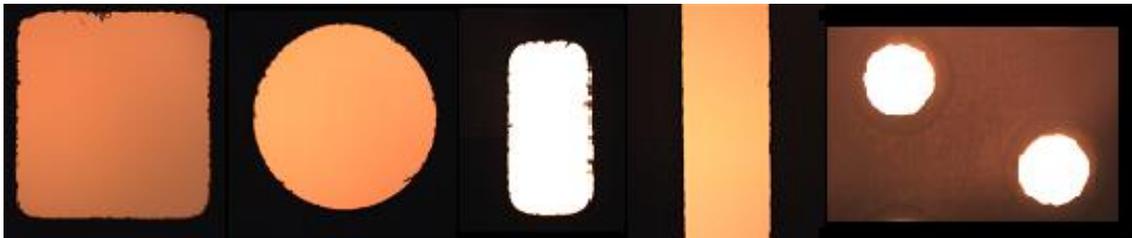
Después del espejo, montar el lente objetivo M-40X previamente ensamblado en su montura junto con el soporte y el poste, y ajustar la altura de manera que el haz entre por la apertura del objetivo.

Ensamblar el conjunto de expansor de haz y colocar después del objetivo, siguiendo la trayectoria del haz de láser. Adjuntar el poste SP-3 en la base B-2SA y sobre ésta, montar el lente de colimación LC-V.

6. Pantalla con aberturas

Las figuras que se utilizaron para las aberturas fueron de forma circular, cuadrada, rectangular y rendija como se muestran en la Figura 3.4, donde el inciso a muestra las fotografías ampliadas de las aberturas y el inciso b sus medidas aproximadas.

a)



b)

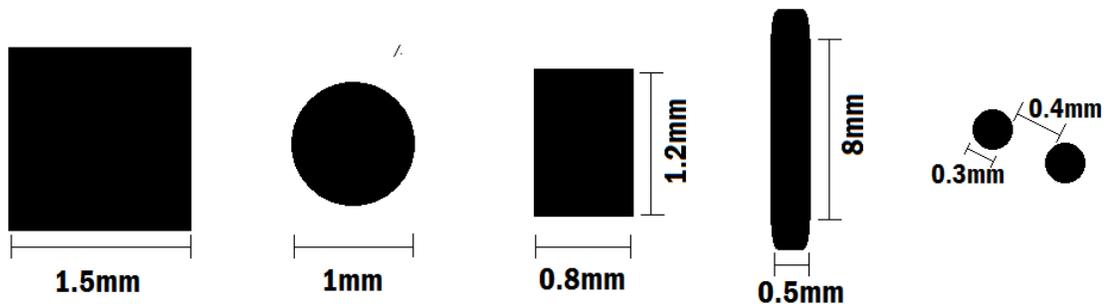


Figura 3.4 Representación ampliada de las formas de las aberturas

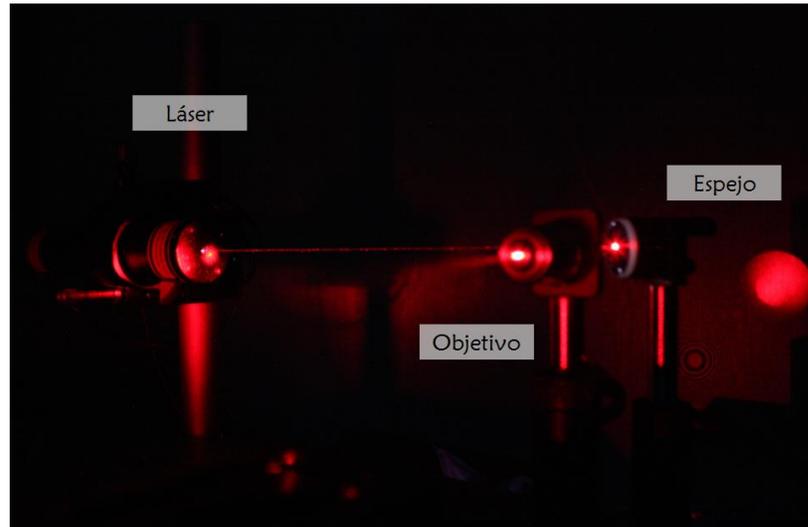


Figura 3.5 Haz del láser del experimento de Young

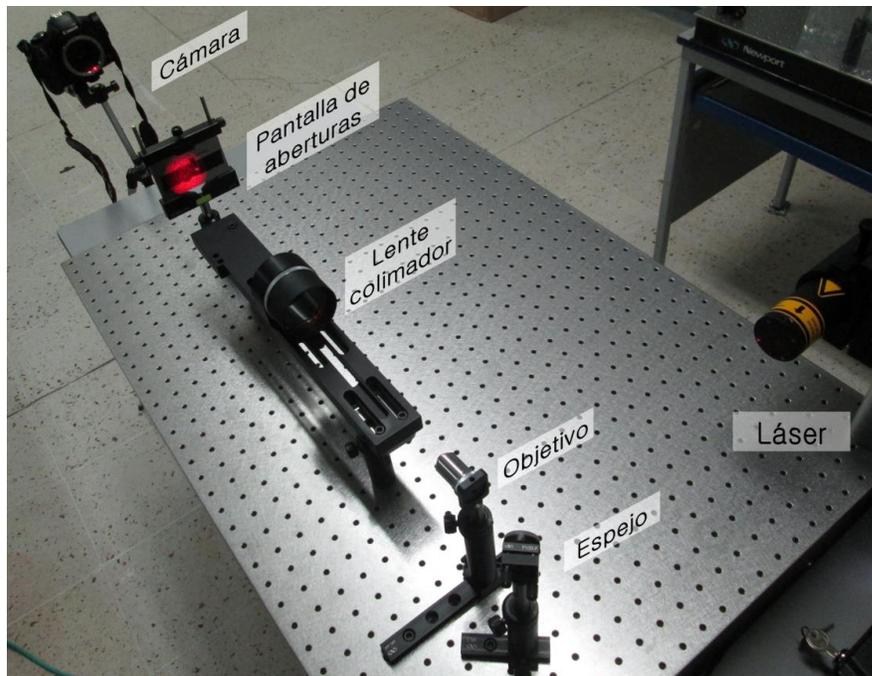


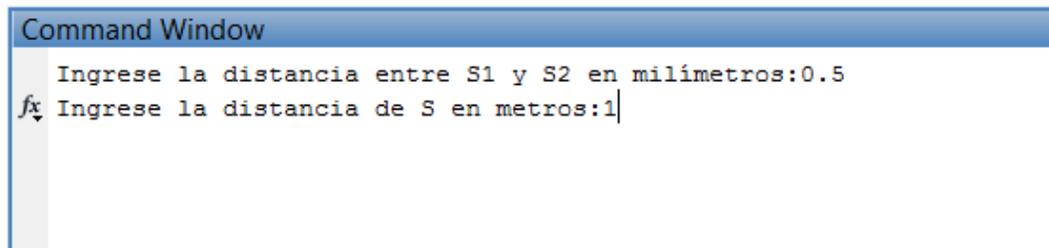
Figura 3.6 Experimento de Young con equipo de Newport

En la *Figura 3.5*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra las condiciones idóneas para que el haz de luz del láser y la interferencia generada sea percibido, particularmente en esta fotografía se muestra cómo el haz es generado por el láser, direccionado por el espejo y aumentado por el objetivo.

En la *Figura 3.6* se muestra el experimento de Young con equipo de Newport, tomando como inicio al láser, y como punto final a la cámara fotográfica que funciona como sensor de interferencia.

3.2. Experimento de Young simulado por computadora

Se realizó un programa en la herramienta de software llamada MATLAB, que principalmente representa la pantalla de aberturas que simula a dos rendijas y la distancia entre ellas, seguida de una pantalla donde se percibe el patrón de franjas de interferencia de forma bidimensional.



```
Command Window
Ingrese la distancia entre S1 y S2 en milímetros:0.5
fx Ingrese la distancia de S en metros:1
```

Figura 3.7 Pantalla de comandos en MATLAB

En la *Figura 3.7* se muestra la pantalla de comandos y el programa tiene solo dos variables a ingresar por el usuario: a la variable S , que es la distancia en metros entre el plano de aperturas y el plano donde se percibe la interferencia; la variable a es la distancia en milímetros entre las rendijas S_1 y S_2 ; además, tomando en cuenta que el experimento ha sido con haz de luz láser con longitud de onda (λ) de 633nm, se colocó en el código de forma predeterminada, aunque en la *Tabla 4-8* su valor se sustituyó con

otras longitudes de onda, todo esto con la finalidad de percibir los cambios ideales de la interferencia.

Se muestra a continuación la metodología con la que se desarrolló el código para definir las variables y fórmulas que se ocuparon en la simulación:

1. Se definió al plano X y Y.
2. Se definió a la constante lambda con una longitud de onda ya establecida como “lambda=0.633” micras (aunque este parámetro se podía cambiar si se considera pertinente simular distintas longitudes de onda de otras fuentes de luz coherentes).
3. Se definió a la variable “a” como la distancia entre S1 y S2.
4. Se definió a la variable “s” como la distancia entre planos.
5. A “I0” se definió como una constante de 1.
6. Se ingresó la ecuación para calcular la irradiancia del patrón de interferencia “ $I=4*I0*(\cos((X*a*\pi)/(s*\lambda)))^2$ ”.
7. El resultado se mapeó en dos planos independientes uno de otro: el primero simuló el plano de las aberturas y su separación entre estas, y el segundo representaba el plano del patrón de interferencia obtenido.

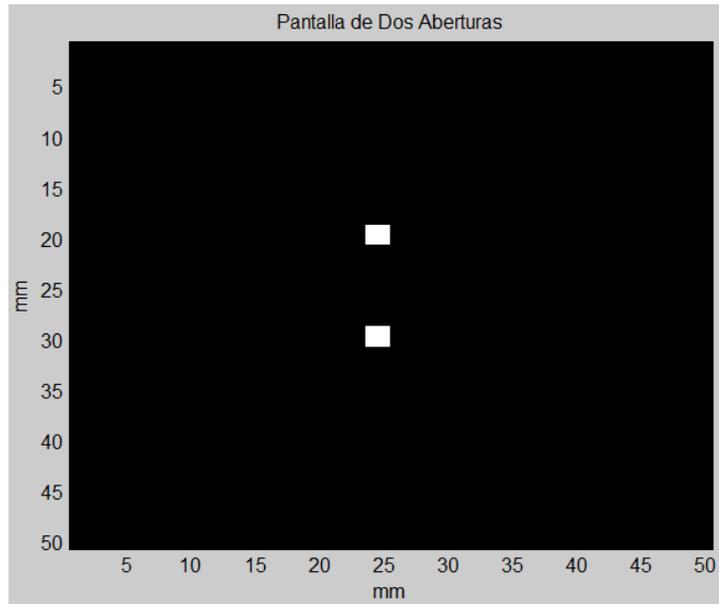


Figura 3.8 Plano de dos aberturas en MATLAB

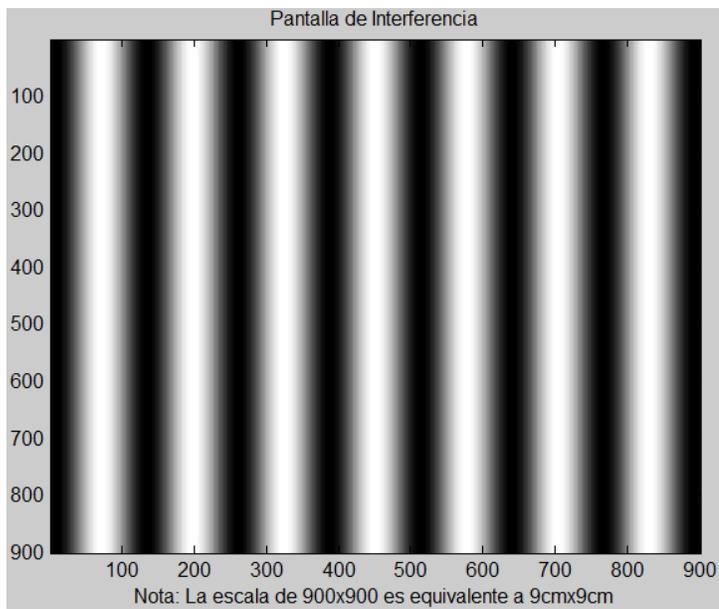


Figura 3.9 Patrón de interferencia en MATLAB

Capítulo 3: Arreglo interferométrico de Young

La simulación de forma básica del plano de aberturas se muestra en la Figura 3.8, generalizada con rendijas cuadradas, pues la forma no afecta en el resultado de la interferencia de este programa. La escala de esta pantalla es de aprox. 5x5cm.

Al plano de aberturas le sigue el plano de interferencia, como se muestra en la Figura 3.9, con dimensiones aproximadas de 9x9cm, esto representa solo parte de la interferencia que se genera con la simulación que se desarrolló en MATLAB.

Capítulo 4:

Resultados

En este capítulo se recopila en tablas comparativas las fotografías de difracción de diferentes figuras e interferencia de dos haces resultantes del experimento de Young que se armó en laboratorio. Además se muestran resultados de la interferencia del programa simulado en MATLAB.

Capítulo 4 Resultados

4.1. Difracción de aperturas con distintas formas generadas en laboratorio

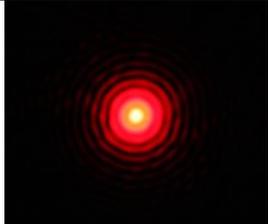
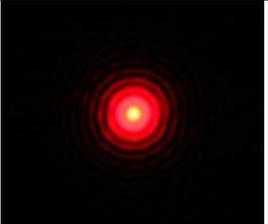
En la Figura 3.4 del Capítulo 3 se muestran las formas de las aperturas utilizadas para representar el fenómeno de difracción. A continuación, se muestra en las siguientes tablas, una parte de los resultados obtenidos recopilados en fotografías. También se pueden ver más fotografías en el Anexo.

4.1.1. Difracción del círculo a distintos tiempos de exposición

En la tabla 4.1 se muestran los patrones de difracción para una apertura circular a diferentes tiempos de exposición, desde 1/800s a 1/4000s.

La apertura circular tiene un diámetro aproximado de 1mm. Las fotografías han sido ordenadas por el tiempo de exposición, y en todas se puede percibir el fenómeno de difracción.

Tabla 4-1 Abertura circular a 1m de distancia

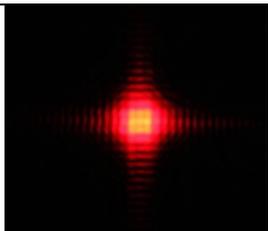
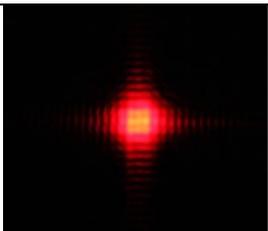
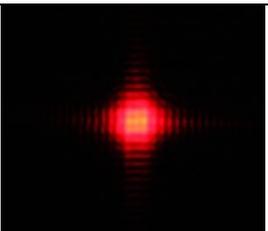
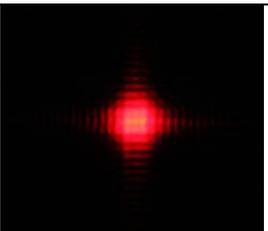
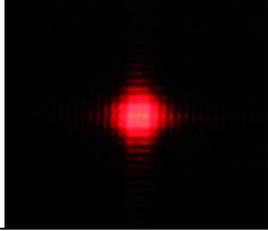
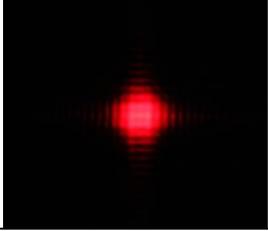
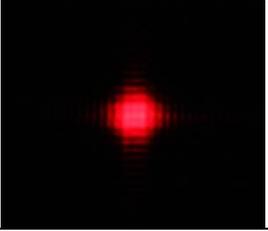
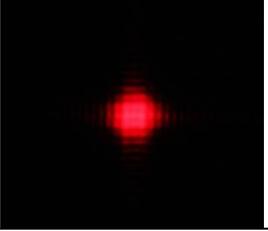
1/800s	1/1000s	1/1250s	1/1600s
			
1/2000s	1/2500s	1/3200s	1/4000s
			

4.1.2. Difracción del cuadrado a distintos tiempos de exposición

La Tabla 4-2 Abertura cuadrada a 1m de distancia muestran los patrones de difracción para una apertura cuadrada a diferentes tiempos de exposición, desde 1/800s a 1/4000s.

La apertura de forma cuadrada mide aproximadamente 1.5mm cada lado, en las fotografías capturadas a una distancia de 1m se percibe el fenómeno de difracción.

Tabla 4-2 Abertura cuadrada a 1m de distancia

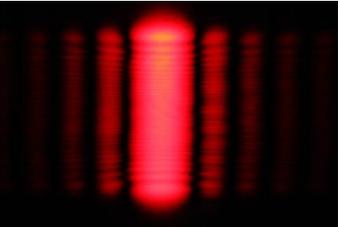
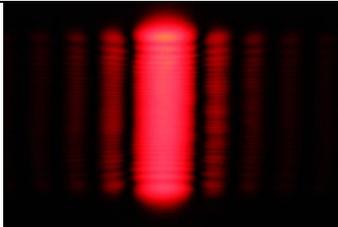
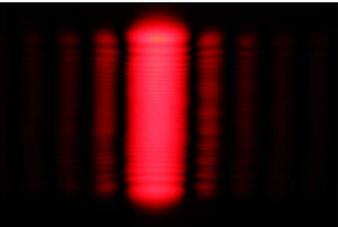
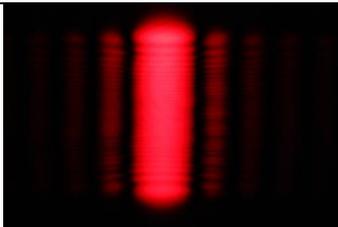
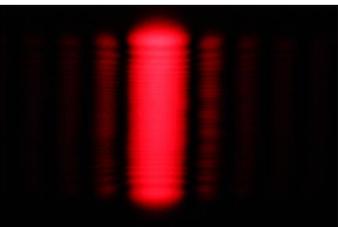
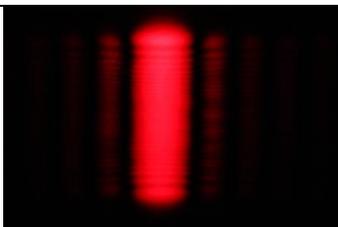
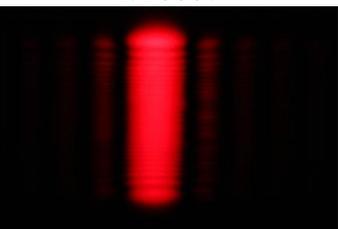
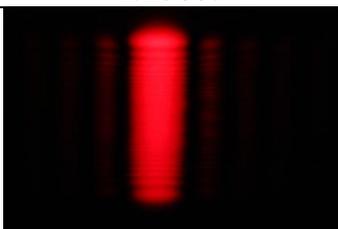
1/800s	1/1000s	1/1250s	1/1600s
			
1/2000s	1/2500s	1/3200s	1/4000s
			

4.1.3. Rendijas por tiempo de exposición

En la Tabla 4-3 muestra los patrones de difracción para una rendija a diferentes tiempos de exposición, desde 1/800s a 1/4000s.

La rendija tiene un ancho de 0.5mm y se puede percibir notablemente la franja central con más irradiancia que las demás.

Tabla 4-3 Rendija a 1m de distancia

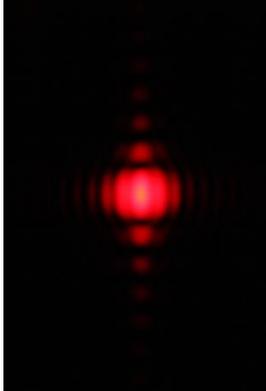
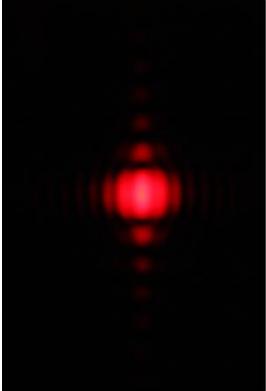
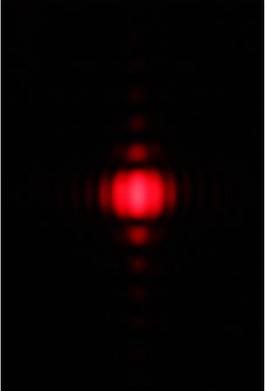
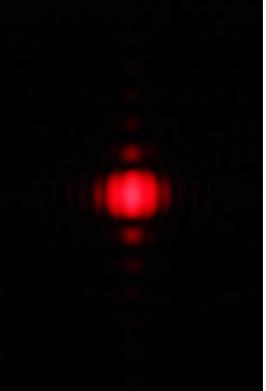
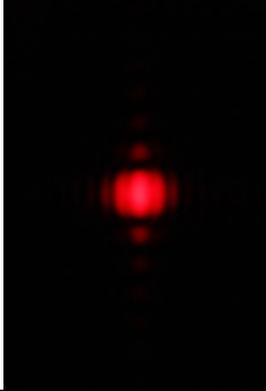
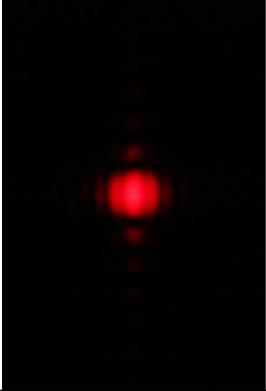
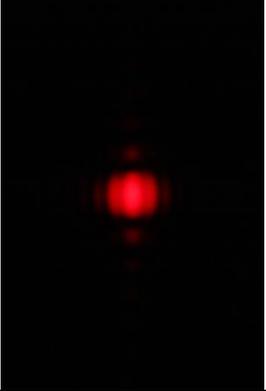
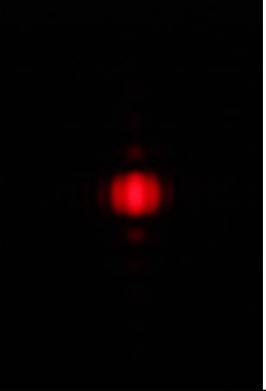
<p style="text-align: center;">1/500s</p> 	<p style="text-align: center;">1/640s</p> 
<p style="text-align: center;">1/800s</p> 	<p style="text-align: center;">1/1000s</p> 
<p style="text-align: center;">1/1250s</p> 	<p style="text-align: center;">1/1600s</p> 
<p style="text-align: center;">1/2000s</p> 	<p style="text-align: center;">1/2500s</p> 

4.1.4. Rectángulo por Tiempo de exposición

En la Tabla 4-4 se muestran los patrones de difracción para una apertura rectangular a diferentes tiempos de exposición, desde 1/800s a 1/4000s.

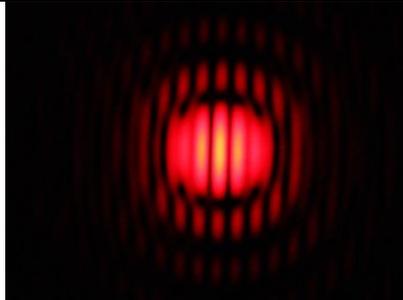
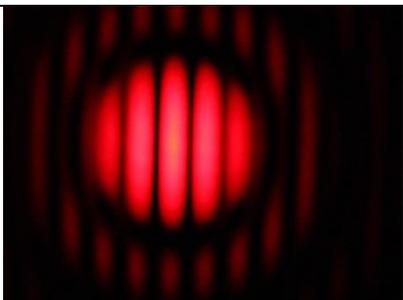
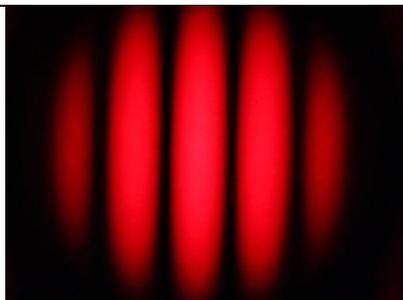
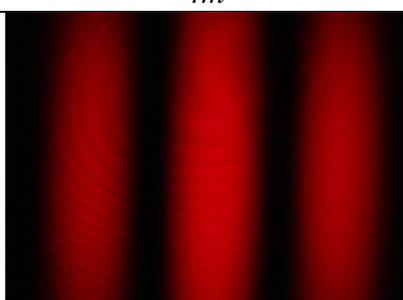
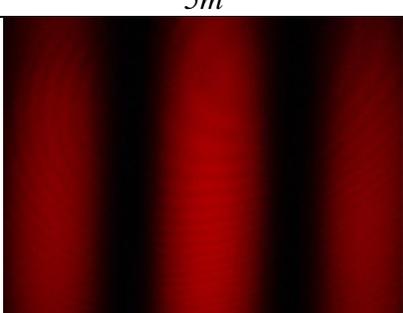
El rectángulo tiene dimensiones aproximadas de 1.2mm x 0.8mm colocado de forma vertical de acuerdo a la del capítulo 3. Se observa que el patrón es parecido al cuadrado pero con curvas.

Tabla 4-4 Abertura rectangular a 1m de distancia

1/800s	1/1000s	1/1250s	1/1600s
			
1/2000s	1/2500s	1/3200s	1/4000s
			

4.2. Interferencia de dos aperturas circulares mediante el experimento de Young generados en laboratorio

Tabla 4-5 Interferencia de dos aperturas circulares a de 5cm a 6m

5cm	0.5m
	
1m	2m
	
3m	4m
	
5m	6m
	

Y en la Tabla 4-5 se muestra la difracción e interferencia de dos aperturas circulares, todas a 1/100s de exposición.

Los círculos tienen un diámetro aproximado de 0.3mm, con una separación entre ellos de 0.35mm. Como puede percibirse en la primera imagen, los puntos están ligeramente inclinados hacia la derecha, esto debido a la posición de la pantalla de aberturas.

4.3. Interferencia de dos aperturas circulares mediante el interferómetro de Young generado en computadora

En la Tabla 4-6 se muestra la pantalla de aperturas y la pantalla de interferencia, y cómo van cambiando de acuerdo a la distancia a y cuando $S = 1$ en todos los casos cuando $a = 0.4\text{mm}$ y S con valor de 5cm a 6m.

Tabla 4-6 Pantalla de Aberturas y Pantalla de interferencia

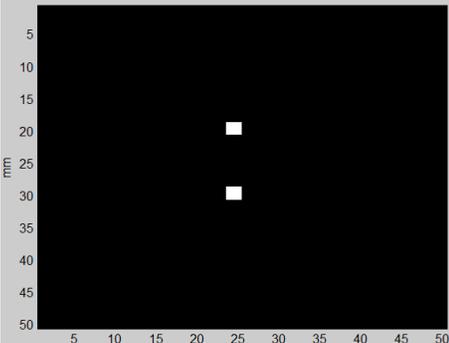
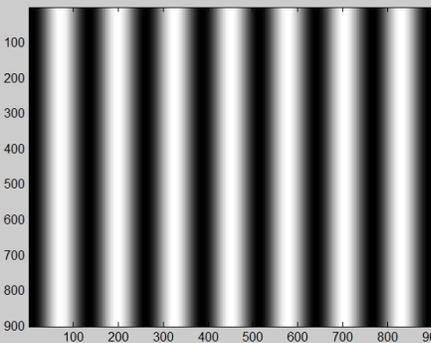
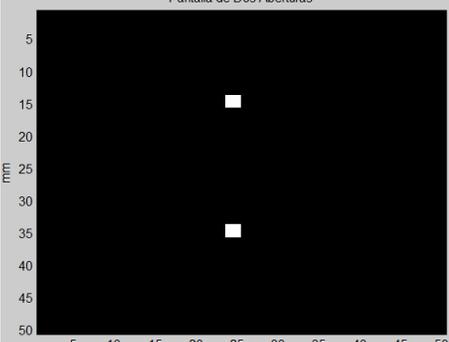
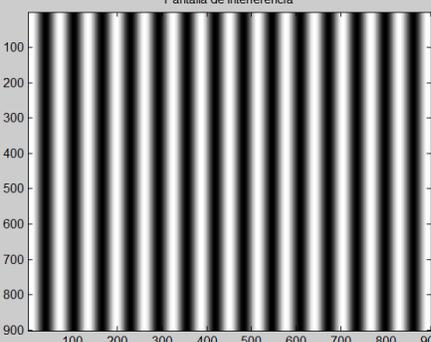
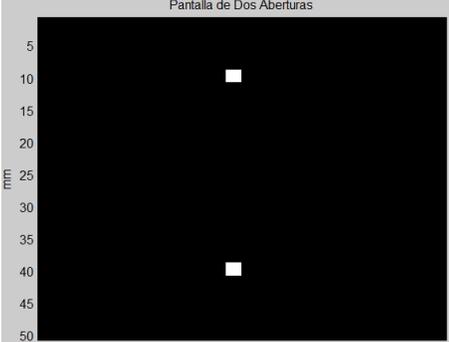
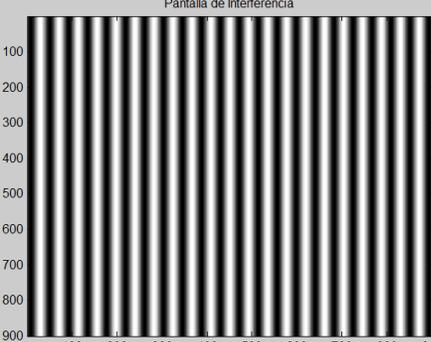
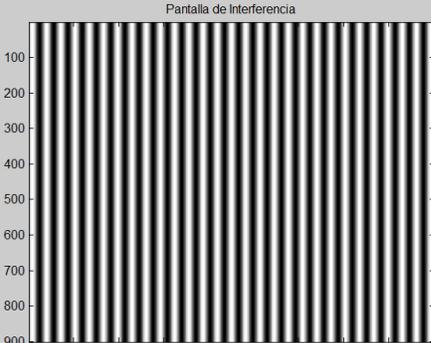
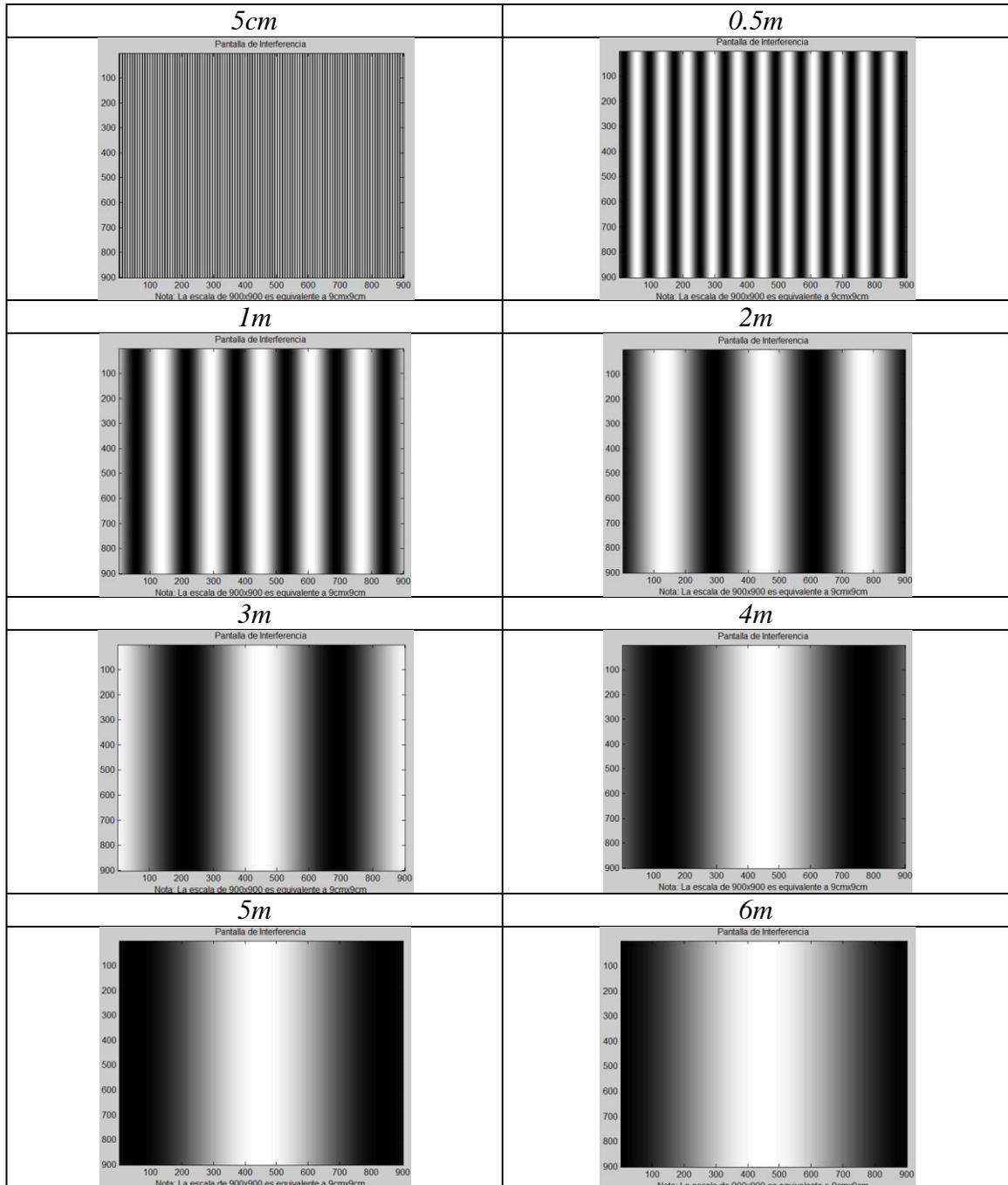
Distancias	Pantalla de aberturas	Pantalla de interferencia
$a = 0.5mm$	<p>Pantalla de Dos Aberturas</p> 	<p>Pantalla de Interferencia</p> 
$a = 1mm$	<p>Pantalla de Dos Aberturas</p> 	<p>Pantalla de Interferencia</p> 
$a = 1.5mm$	<p>Pantalla de Dos Aberturas</p> 	<p>Pantalla de Interferencia</p> 
$a = 2mm$	<p>Pantalla de Dos Aberturas</p> 	<p>Pantalla de Interferencia</p> 

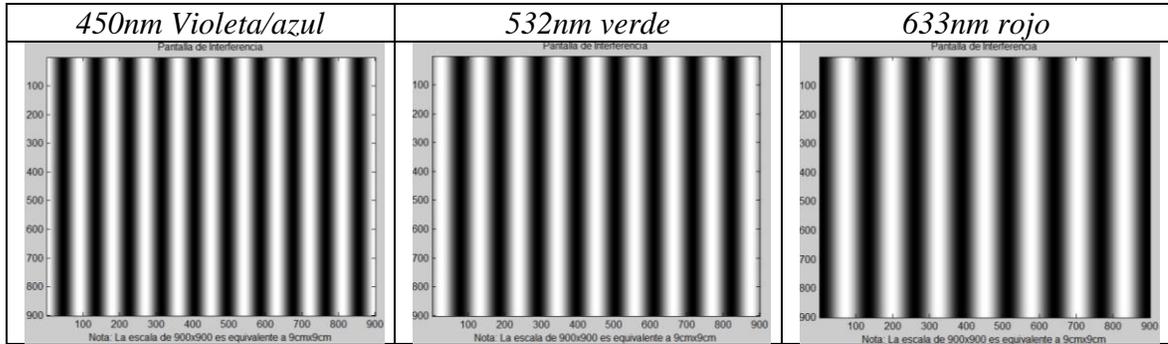
Tabla 4-7 Pantalla de interferencia a distintas variables S .



Se puede percibir en la Tabla 4-7 el cambio del grosor de las franjas mientras va aumentando la distancia S .

En la Tabla 4-8 vemos los resultados de tres parámetros donde se modificó sólo la longitud de onda, cuando $a=0.5$ mm y $s=1$ m.

Tabla 4-8 Pantalla de interferencia variando la longitud de onda (λ)



Capítulo 5:

Discusión de resultados

El Capítulo cinco se analizan los resultados obtenidos del experimento en laboratorio y de la simulación. Se exponen las ventajas y además se hacen las comparaciones entre cada método.

Capítulo 5 Discusión de resultados

5.1. Resultados del desarrollo de la metodología

El propósito fundamental de la presente tesis que se llevó a cabo fue desarrollar teórica y prácticamente el experimento de Young y su relación hacia la holografía, desarrollado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería con equipo de Newport y con un pequeño programa en MATLAB para contrastar los resultados de ambos.

Anteriormente al equipo Newport del que se hace uso, el laboratorio de Física de ésta Universidad facilitó el uso de sus instalaciones y equipo como un láser, un objetivo de microscopio, diversas lentes y algunos diafragmas para simular las rendijas de difracción, como se muestra en la *Figura 5.1* con el objetivo de aprender a manejar el equipo y recrear los distintos fenómenos principalmente la difracción.



Figura 5.1 Experimento de difracción antes del equipo de Newport

Los resultados permitían percibir el fenómeno de difracción con distintas formas de aperturas, aunque no bien definidos. Se puede notar entonces que los resultados dependen de factores, uno de ellos es el ambiente (el laboratorio), ya que se percibió que

debe estar aislado completamente de luz externa y que el experimento tenga un buen espacio para percibir los fenómenos a distintas distancias. La cámara con la que se tomó la *Figura 5.2* no tiene capacidad para capturar el fenómeno a una nitidez y a una buena resolución.

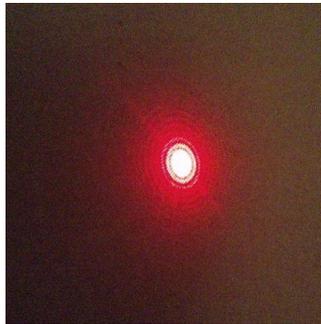


Figura 5.2 Difracción de una apertura circular

El experimento presentado en esta investigación se realizó con el equipo de Newport, que es descrito en el capítulo 3, con un láser de 633nm como emisor de luz coherente. El haz fue alineado, expandido y colimado para percibir con mayor nitidez la imagen.

Se pudo observar que el experimento de Young debe acoplarse con alta precisión, debido a que alteraciones a sus elementos perturba los resultados. Sin embargo, ofrece una sensibilidad elevada para observar cambios en el ambiente que no son percibidos por nuestros sentidos como las características precisas de una superficie, medir distancias muy pequeñas, índices de refracción, o algunas otras aplicaciones.

La fase δ depende de las propiedades de los medios por el cual se desplazan las ondas, y esto se ve reflejado en el patrón de interferencia entre los máximos y mínimos.

Aperturas de aprox 0.3mm de diámetro con una distancia entre ellas de aprox 0.4mm, con franjas de interferencia.

En la *Figura 5.3*, se pudo observar el principio de Huygens que se menciona en el capítulo 2, ya que las dos aperturas circulares actuaron como fuentes de ondas secundarios.

En la *Figura 5.4*, al pasar la luz del láser a través de la apertura de este círculo, se produce un patrón de difracción, que se puede distinguir con los anillos concéntricos en ambos casos. Las imágenes se tomaron a una distancia de 1m, tienen la misma velocidad ISO y tiempo de exposición. En la *Figura 5.3* proveniente de una apertura circular, se observa mayor irradiancia, debido a que la apertura tiene un diámetro de 1mm, mientras que en la *Figura 5.4* donde se observan el patrón de interferencia de dos aperturas, sólo se puede observar el centro y ligeramente un anillo de difracción, además de que el diámetro de cada apertura es más pequeño. Las diferencias entre un patrón y otro son notorias; en la segunda imagen se muestran las franjas de interferencia.

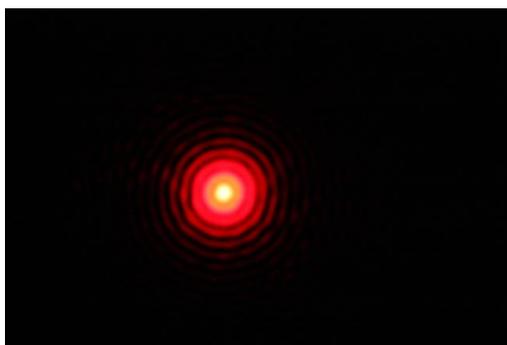


Figura 5.3 Patrón de difracción



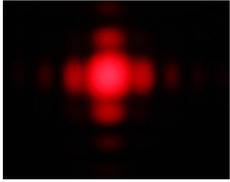
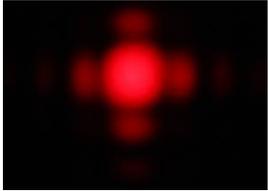
Figura 5.4 Patrón de interferencia formado por dos aperturas circulares

5.2. Difracción del experimento con diferentes aberturas

Se ha representado mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, una comparación de los resultados obtenidos considerando las mismas condiciones como distancia, tiempo de exposición, velocidad ISO y distancia. Cambia el tamaño y las figuras de las aperturas.

Tabla 5-1 Comparación progresiva de figuras de 0.5m a 6m de distancia con exposición de 1/1250s

	Cuadrado	Círculo	Rectángulo	Rendija
1/1250s – 0.5m				
1/1250s – 1m				
1/1250s – 2m				
1/1250s – 3m				
1/1250s – 4m				

	Cuadrado	Círculo	Rectángulo	Rendija
1/1250 s – 5m				
1/1250 s – 6m				

Además de la distancia S , existe un factor determinante en la información representada en las imágenes, en este caso, y es la velocidad ISO, ya que representa la sensibilidad de un sensor.

La difracción observada en cada una de las tablas del Capítulo 3, muestra que entre menos ISO, se va perdiendo los órdenes de interferencia.

5.3. Comparación de patrones de interferencia obtenidos en laboratorio y por computadora del experimento de Young

En el arreglo de laboratorio, se pudieron percatar en los patrones las diferencias en las características de las franjas si se cambiaban factores como la distancia entre aberturas porque éstas no deben sobrepasar los milímetros, y la distancia entre el plano de aberturas y el plano de interferencia que cambia considerablemente conforme ésta va aumentando o disminuyendo, además de la forma de las ranuras ya que esta última característica permite distinguir la interferencia de la difracción.

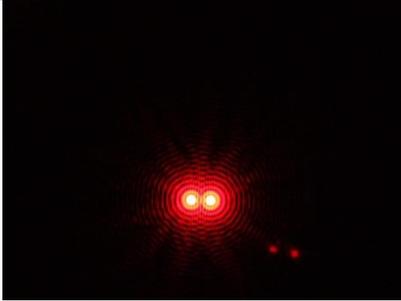
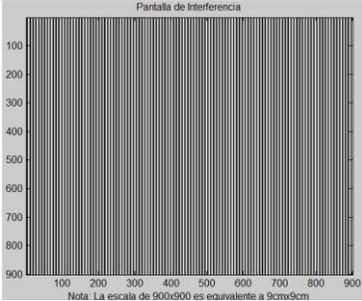
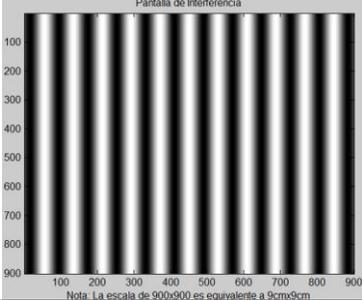
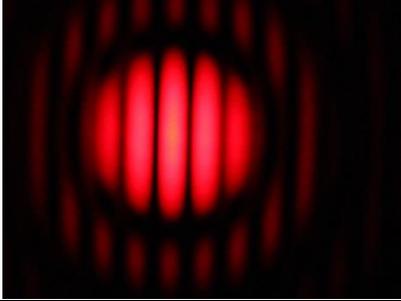
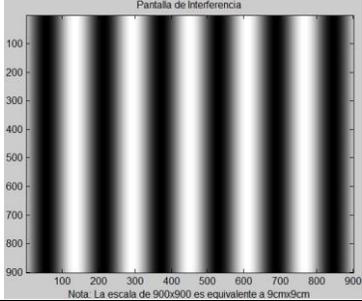
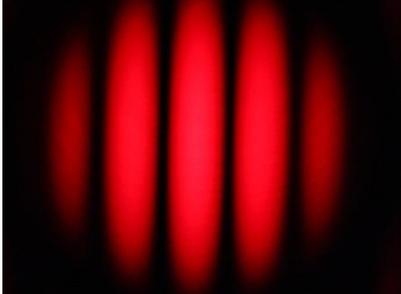
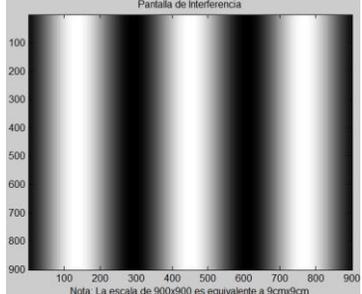
- a) Distancia de aberturas. La distancia de aberturas está relacionada con la irradiancia de las franjas, es decir si se observan más o menos brillantes.
- b) Distancia entre pantallas. Conforme la pantalla de interferencia se aleja de la pantalla de las aberturas, las franjas de interferencia se hacen más grandes (anchas), cambiando así su periodo espacial, pero a su vez la irradiancia se va perdiendo, así como los lóbulos que corresponden a un orden de valores resultado de la irradiancia.
- c) Forma de aberturas. La forma de aberturas circulas forma anillos alrededor del centro. La forma cuadrada forma una tipo cruz y varios lóbulos que van perdiendo irradiancia, llamados ordenes de difracción. Pero en la de interferencia de dos aberturas circulares generadas en laboratorio, puede percibirse claramente la diferencia entre interferencia y difracción; la primera se percibe en forma de franjas y la segunda en forma de anillos. Ambos, fenómenos de la luz en su forma ondulatoria, y la capacidad de atravesar objetos para formar nuevos trenes de onda.

En el caso de los resultados obtenidos en la simulación, el código muestra el patrón de interferencia. Asimismo, ayuda a tener una referencia y comparar con los resultados

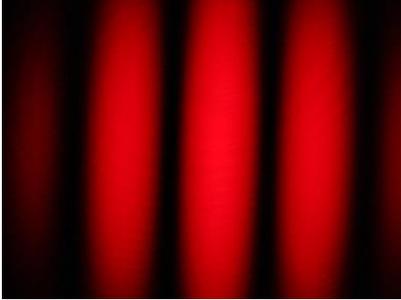
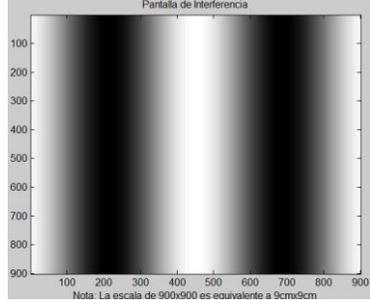
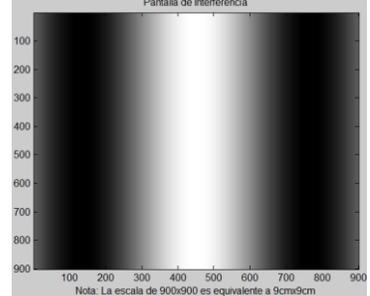
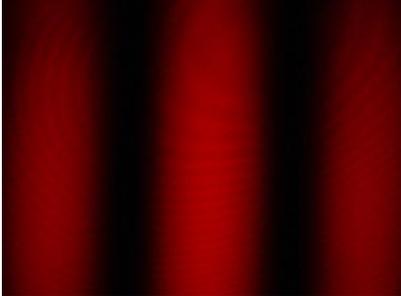
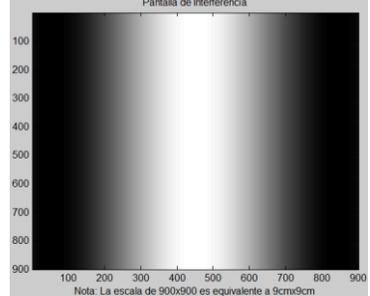
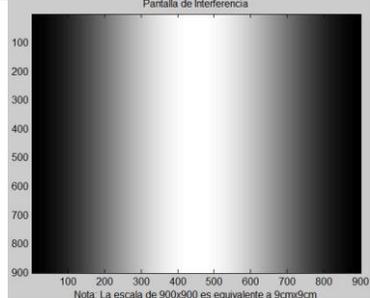
reales. En la Tabla 4-8 puede percibirse cómo cambian las franjas de interferencia, ya que la variable que se cambia es la longitud de onda. Examinando las tres imágenes, se puede percibir que entre mayor longitud de onda, más anchas son las franjas.

La Tabla 5-2 es una comparación entre los patrones de interferencia del experimento y las simulaciones, donde en la primera columna se especifican las distancias entre la pantalla de aberturas y la pantalla de interferencia (S); en la segunda columna se comparan las imágenes reales capturadas con la cámara del experimento en laboratorio y las simulaciones obtenidas de MATLAB; por último, en la tercera columna se perciben las franjas de la irradiancia resultante, tomando en cuenta sólo las franjas de interferencia, ya que si bien en las fotografías de la segunda columna se muestra la difracción de las aberturas circulares, en las simulaciones de la tercera columna sólo se obtiene el patrón de interferencia ya que no se consideró simular la forma de las aberturas. La distancia entre las aberturas circulares es aproximadamente $a=0.4\text{mm}$ en ambos experimentos.

Tabla 5-2 Comparación de patrones de interferencia de laboratorio y simulación

Distancia	Laboratorio	Simulación en Matlab
$S=5\text{cm}$		 <p data-bbox="1003 499 1365 800">Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>
$S=0.5\text{m}$		 <p data-bbox="1003 804 1365 1104">Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>
$S=1\text{m}$		 <p data-bbox="1003 1108 1365 1409">Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>
$S=2\text{m}$		 <p data-bbox="1003 1413 1365 1707">Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>

Capítulo 5: Discusión de resultados

Distancia	Laboratorio	Simulación en Matlab
$S=3m$		 <p>Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>
$S=4m$		 <p>Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>
$S=5m$		 <p>Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>
$S=6m$		 <p>Nota: La escala de 900x900 es equivalente a 9cmx9cm</p>

Capítulo 6:

Conclusiones

En este capítulo se mencionan las observaciones de acuerdo a los resultados que se obtuvieron del experimento de Young en laboratorio y en la simulación de MATLAB.

Capítulo 6 Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

Las propiedades de la luz se investigaron de forma teórica en fuentes confiables y de esa forma se pudo elegir el arreglo interferométrico, así como determinar las condiciones, el material y el proceso a las que lo someteríamos. Se optó por montar el experimento de Young, ya que a diferencia de otros interferómetros, se consideró óptimo para iniciar el proceso de investigación, para observar los fenómenos de difracción (por el uso de pequeñas aperturas como fuentes secundarias) e interferencia y para iniciar con el desarrollo de interferómetros.

Se eligió el espectro de 633nm porque esta era la longitud de onda del láser de He-Ne que se ocupó como la fuente de luz del experimento.

Se hicieron varias pruebas para definir el tamaño y la forma de las aberturas que se iban a utilizar, y se pudo percibir que los bordes de las primeras aberturas con las que se hicieron comprobaciones, presentaban ligeros defectos que modificaban el patrón resultante porque afectaba el material con el que estaban hechos.

Se analizó matemáticamente la fórmula de la interferencia, mejor conocida como irradiancia, para conocer los parámetros que determinarían las condiciones de los patrones de interferencia, tanto en la simulación como en el arreglo interferométrico.

Habiéndose familiarizado con el arreglo y observando el fenómeno de difracción de la luz, se sometió a varios parámetros y los patrones se registraron con la cámara. Posteriormente se usaron dos aberturas del mismo tamaño para observar el fenómeno de interferencia, aunque definitivamente estas aberturas deben ser considerablemente pequeñas, como lo sustenta el marco teórico. Sin embargo, este patrón se logra ver más tenue a diferencia de los patrones obtenidos de la difracción.

El desarrollo del programa fue en MATLAB con un código sencillo que solo consistía en ingresar el valor de las variables de la fórmula de la irradiancia y se cumplió el objetivo, aunque se considera que puede desarrollarse de forma más interactiva para el usuario final.

En el capítulo de resultados, se comparan los patrones obtenidos el arreglo con la simulación. En todos los resultados que se perciben en las tablas con fotografías, se puede observar que cuando el tiempo de exposición de la cámara es menor, los órdenes de interferencia se van perdiendo, ejemplo de ello en la difracción circular se ve cuando los aros van desapareciendo y por ende, se pierde más información. Otros factores que hacen perder información a la imagen es la distancia S , entre mayor sea, más tenue se ven las imágenes. En la simulación obtenida del software se percibió que también cuando la distancia a se va haciendo más grande, las franjas se van separando.

El tamaño y las distancias entre las ranuras que se manejan en el plano de aberturas hacen que sea más complicado para darle un uso a la holografía, ya que el haz de referencia y el haz del objeto necesitan otras condiciones.

A lo largo de la investigación, se han evaluado las distintas ventajas y desventajas entre el arreglo en laboratorio y la simulación del experimento de Young. Se concluye que todo depende del uso que se vaya a dar al experimento. Si sólo se busca comprender las propiedades de la luz y el experimento puede ser sólo de forma simulada, pero si se busca darle una aplicación y desarrollar trabajos futuros, se tendría que desarrollar el arreglo en laboratorio y con equipo adecuado porque algunas perturbaciones de los instrumentos o del ambiente pueden generar cambios en los resultados. Incluso con la mayor parte del equipo que utilizamos, se pueden desarrollar otros tipos de interferómetros.

6.2. Trabajos futuros

Como trabajo a futuro se programarán nuevas rutinas que permitan observar los patrones de interferencia y también de difracción en la misma imagen, para diferentes geometrías de aperturas. Este trabajo implica conocimientos y el uso de transformadas de Fourier que quedaban fuera de los objetivos de la tesis.

Glosario

Glosario

CCD.- Charge Couple Device (Dispositivo de Carga Acoplada) Sensor fotoeléctrico con mayor sensibilidad, linealidad y la información que capta puede ser procesada digitalmente.

Chip de microfluidos.- Dispositivo detector que permite hacer el análisis químico de sustancias.

LASER .- (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

Medio homogéneo.- Medio en el que las propiedades que lo definen son independientes de la posición del punto en el medio, pero pueden depender de variables tales como el tiempo, la dirección, la temperatura, etc.

Medio isótropo.- Las propiedades son las mismas en cualquier dirección.

MF.- (Static Magnetic Field) Campo Magnético Estático

Número F en fotografía.- La apertura del diafragma en el objetivo.

Refractómetro.- instrumento óptico que sirve para determinar el porcentaje de sólidos solubles en una disolución líquida.

Rendija.- Hendidura o abertura larga y estrecha que se produce en un objeto sólido.

Tiempo de exposición.- El tiempo que la luz está alcanzando el sensor digital.

Velocidad ISO.- Controla la sensibilidad de la cámara a la luz.

Bibliografía

Bibliografía

1. *Alonso Sánchez, M., Lozano del Águila, A., & Vallecillo, A. (s.f.).* Departamento de Física y Química. *Recuperado el 16 de Mayo de 2015, de <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>*
2. *Arca, A. (2006).* Historia de las Telecomunicaciones. *Obtenido de http://histel.com/z_histel/biografias.php?id_nombre=53*
3. *Arieli, R. (s.f.).* "The Laser Adventure". *Obtenido de <http://www.um.es/LEQ/laser/Ch-10/F10s1p8.htm>*
4. *Arieli, R. (s.f.).* "The Laser Adventure". *Recuperado el 2015 de Febrero de 13, de <http://www.um.es/LEQ/laser/Ch-10/F10s1p8.htm>*
5. *Babilonia Perez, O. (2012).* *Simulación de la Difracción de Pulsos Ópticos Producidos por Rendijas Cuadradas y Circulares.*
6. *Beltrán L., V. (1992).* Para atrapar un fotón. *Obtenido de La ciencia para todos: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/sec_8.htm*
7. *Born, M., & Wolf, E. (1970).* Principles of Optics. *Liverpool: Pergamon Press.*
8. *Carreño, F. (2001).* *Optica física: problemas y ejercicios resueltos. Pearson Educación.*
9. *Castillo Atoche, A., Pérez Cortés, M., Ortiz Gutiérrez, M., & Vázquez-Castillo, J. (2006).* *Implementación de la FFT en hologramas de Fourier generados con FPGAs.*
10. *Chaitavon, K., & Sumriddetchkajorn, S. (2012).* Built-in-Mask Microfluidic Chip for Highly-Sensitive Young Interferometry-based Refractometer Structure. *Thailand.*
11. *Cruz López, M. L. (Octubre de 2009).* *Recuperación de objetos de fase con microscopía holográfica digital y algoritmos iterativos. Tonantzintla, Puebla.*

12. Dallas, W. J. (2006). *Computer Generated Holograms*. En T.-C. Poon (Ed.), *Digital Holography and Three-Dimensional Display: Principles and Applications*. Tucson, AZ: Springer Science + Business Media, Inc.
13. Diallo, A. (Marzo de 2005). Holographic Technology: Data at the Speed of Light. Recuperado el Junio de 2014, de <http://www.alidiallo.com/US/articles/science/holographic.html>
14. EcuRed. (s.f.). Obtenido de EcuRed: <http://www.ecured.cu/index.php/Interfer%C3%B3metro>
15. Fisicanet. (s.f.). Obtenido de <http://www.fisicanet.com.ar/biografias/cientificos/m/maxwell.php>
16. Fogantini, P. N. (s.f.). Diseño experimental. Refracción de la luz. Recuperado el Junio de 2014, de <http://www2.ib.edu.ar/becaib/cd-ib/trabajos/Fogantini.pdf>
17. Fractal Systems. (s.f.). Holograms, Cheoptics 360. Recuperado el Junio de 2014, de Fractal Systems: <http://www.fractal.ae/hologram/cheoptics-360/>
18. Goodman, J. W. (Septiembre de 1971). *An Introduction to the Principles and Applications of Holography*.
19. Hecht, E. (2000). *Óptica*. Madrid: Addison Wesley Iberoamericana.
20. Johnston, H. (27 de Febrero de 2014). Data stored in magnetic holograms. Obtenido de [physicsworld.com: http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/feb/27/data-stored-in-magnetic-holograms](http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/feb/27/data-stored-in-magnetic-holograms)
21. López Sancho, J. M., Gómez Díaz, M. J., & Moreno Gómez, E. (2006). Museo Virtual de la Ciencia. Obtenido de <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz33.htm>
22. Macedo, R. (16 de 10 de 2013). Ciencia e Ingeniería. Obtenido de <http://www.cienciaeingenieria.com/2013/10/velocidad-de-la-luz-constante-universal.html>
23. Malacara, D. (1989). *Óptica tradicional y moderna*. Obtenido de *La ciencia para todos*: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec_8.htm

24. *Martínez P., E. M., & e. a. (s.f.). Mejoramiento del diseño de hologramas generados por computadora. León, Guanajuato.*
25. *Mendoza Basilio, C. A. (Junio de 2011). Caracterización del espesor de películas delgadas de nanopartículas de oro embenidas en TiO₂ sobre prótesis de titanio mediante interferometría láser. México.*
26. *Newport Corporation. (s.f.). Newport. Recuperado el Octubre de 2014, de <http://www.newport.com/Projects-in-Interferometry/144504/1033/info.aspx>*
27. *Nobelprize.org. (22 de Enero de 2015). Nobelprize.org. Obtenido de http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1933/schrodinger-facts.html*
28. *Pérez Pérez, G. (Febrero de 2014). ESPECTROMETRIA.COM. Obtenido de http://www.espectrometria.com/espectro_electromagntico*
29. *Rodríguez García, J., Virgós, J. M., & Virgós Rovira, . M. (1999). Fundamentos de óptica ondulatoria. Universidad de Oviedo.*
30. *Şan, U., Ustabaş, G., & Saraç, Z. (24 de Agosto de 2015). Non-contact performance analysis of the core materials by digital holographic interferometry. Turquía.*
31. *Segrè, E. Denis Gabor y holografía. Physics Today Collection.*
32. *Serway, R. A., & Jewett, J. J. (2009). Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. Cengage Learning.*
33. *Smith, F. G., & Thompson, J. H. (1971). Optics. Manchester: The Manchester Physics Series.*
34. *Soussan, M. (2004). HOLOGRAPHIC STORAGE TECHNOLOGY: A Viable Solution To The Mass Storage Requirements Of Multimedia Computing. Recuperado el Mayo de 2014, de [holoQuest: the site for everithing holographic: http://www.enteleky.com/holography/mpaper.htm](http://www.enteleky.com/holography/mpaper.htm)*
35. *Tipler, P. A. (1993). Física. Barcelona, España: Editorial Reverté, S. A.*
36. *Tiposde.org. (2014). Tipos de onda. Recuperado el Mayo de 2014, de Portal educativo: <http://www.tiposde.org/ciencias-exactas/66-tipos-de-ondas/>*

37. *Universidad Nacional de Colombia. (28 de Diciembre de 2011). Técnica mejorada para clasificar granos de polen. Recuperado el Junio de 2014, de Agencia de Noticias UN: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/tecnica-mejorada-para-clasificar-granos-de-polen.html>*
38. *Valenzuela, D. (2012). Fisic. Obtenido de <http://www.fisic.ch/cursos/primero-medio/polarizaci%C3%B3n-de-la-luz/>*
39. *Young, H. D., & Freedman, R. A. (s.f.). Física Universitaria con Física Moderna (Vol. 2).*

Anexo

Anexo

A.1. Datos generales del equipo de Newport

La mayoría de los elementos vienen incluidos en el equipo de Newport. A continuación se describen generalmente cada una de las partes de los conjuntos que componen al experimento de Young como lo muestra la Figura 3.1 del conjunto del láser.

<i>Número de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
RG-23-4	2'x3' Tabla óptica con perforaciones para tornillos de 1" de separación.
Mesa de madera	Soporte para la tabla óptica.

Tabla A 1 Conjunto de la Tabla Óptica

<i>Número de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
R-30025	Láser 1mW HeNe
40	Barra
ULM-TILT	Montura del láser
340-RC	Abrazadera

Tabla A 2 Conjunto del Láser

<i>Número de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
ID-0.5	Iris
MH-2P	Montura del Iris
MSP-3	Poste de 3"
MPH-3	Soporte para poste de 3"

Tabla A 3 Conjunto del Iris

<i>Número de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
10D20ER.1	Espejo de 1''
UPA1	Soporte para espejo de 1''
P100-P	Montura para espejo
SP-3	Poste de 3''
VPH-3	Soporte para poste de 3''
MCF	Riel portador plano en miniatura
MRL-3	Miniatura de riel óptico de 3''

Tabla A 4 Conjunto de espejo de dirección

<i>Número de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
B-2SA	Placa de base
LC-V	Módulo colimador
NRC	Lente B.X f=2500mm
M-40X	Lente objetivo
MH-2PM	Montura del objetivo
SP-3	Poste de 3''
SP-4	Poste de 4''
VPH-3	Soporte para poste de 3''
VPH-4	Soporte para poste de 4''
MRL-6M	Miniatura de riel óptico de 6''

Tabla A 5 Conjunto de expansor de haz

<i>Número de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
VLH-3 ^a	Soporte de lente con rango de 0.60 a 3.60 pulgadas de diámetro.
Pantalla con aberturas	La pantalla de metal con aberturas circulares, cuadradas y rendijas.
SP-3	Poste de 3''
VPH-3	Soporte para poste de 3''

Tabla A 6 Montaje de la pantalla con aberturas

<i>Nombre de Pieza</i>	<i>Descripción</i>
Cámara EOS-CANON	Captura las imágenes que se perciben de la interferencia a distintas distancias.
Tripié para cámara	Longitud doblado 36cm y extendido 108cm

Tabla A 7 Pantalla de interferencia

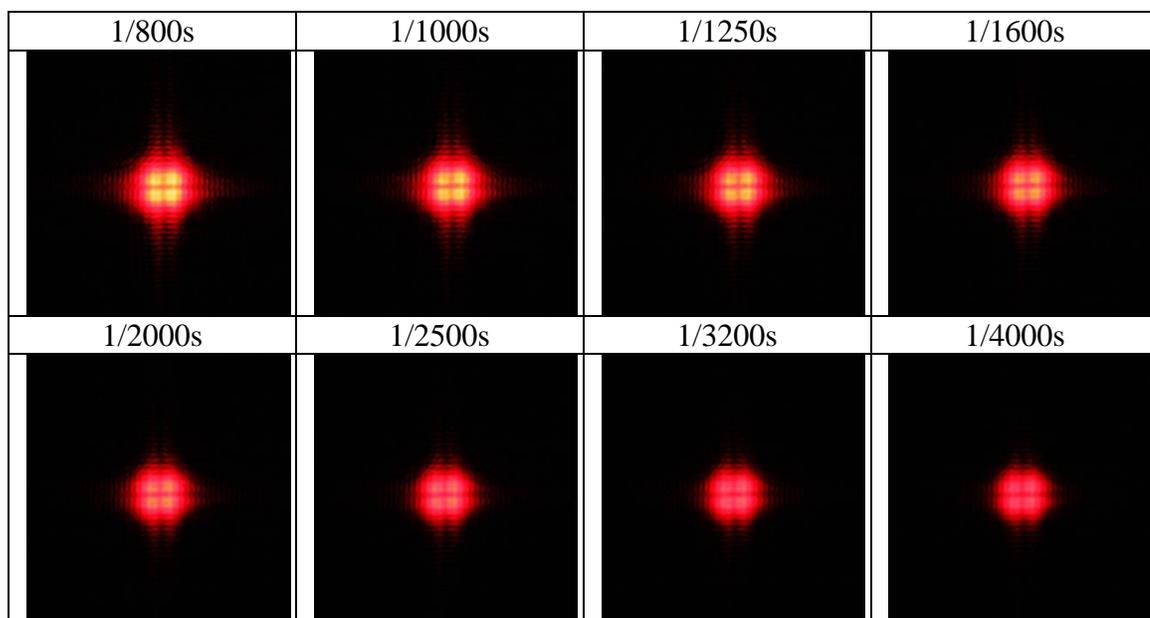
<i>Número de pieza</i>	<i>Descripción</i>
SK-25 ^a	Juego de tornillos de cabeza hueca, tornillos de fijación, tuercas y arandelas de acero con recubrimiento de óxido negro, longitudes desde 0.38 a 2.0 in. (10 a 50 mm) y tipo de rosca 1/4-20.
SK-08 ^a	Juego de tornillos de cabeza hueca, tornillos de fijación, tuercas y arandelas de acero con recubrimiento de óxido negro, longitudes desde 0.38 a 2.0 in. (10 a 50 mm) y tipo de rosca 8-32.
Set de destornilladores de punta hexagonal	Destornilladores hexagonales de varias medidas de diámetros en pulgadas.

Tabla A 8 Otros artículos

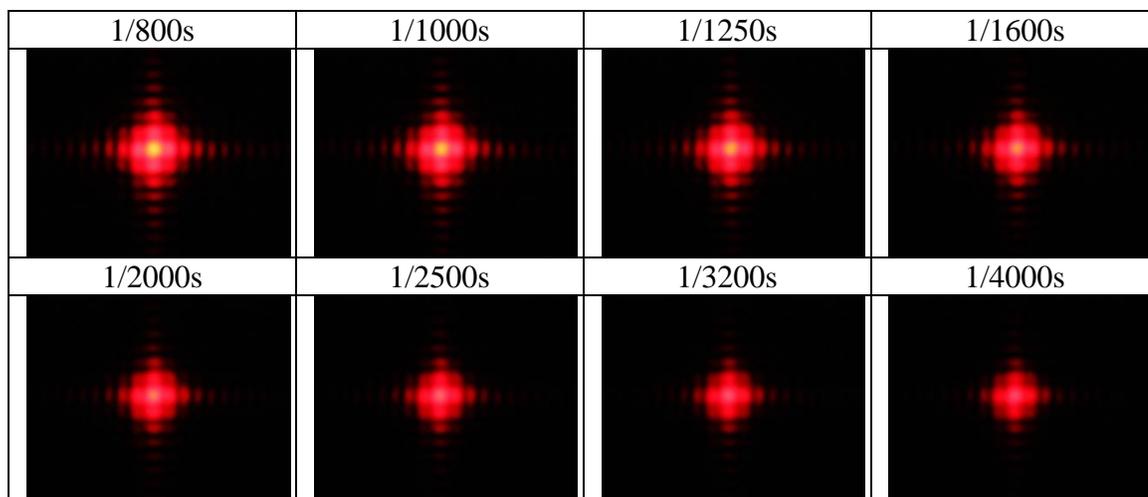
A.2. Cuadrado por tiempo de exposición

Serie de fotografías del haz de láser rojo, pasando por la pantalla de apertura cuadrada de 1.5mm de lado, a distintas distancias S (entre la pantalla de aperturas y pantalla de interferencia).

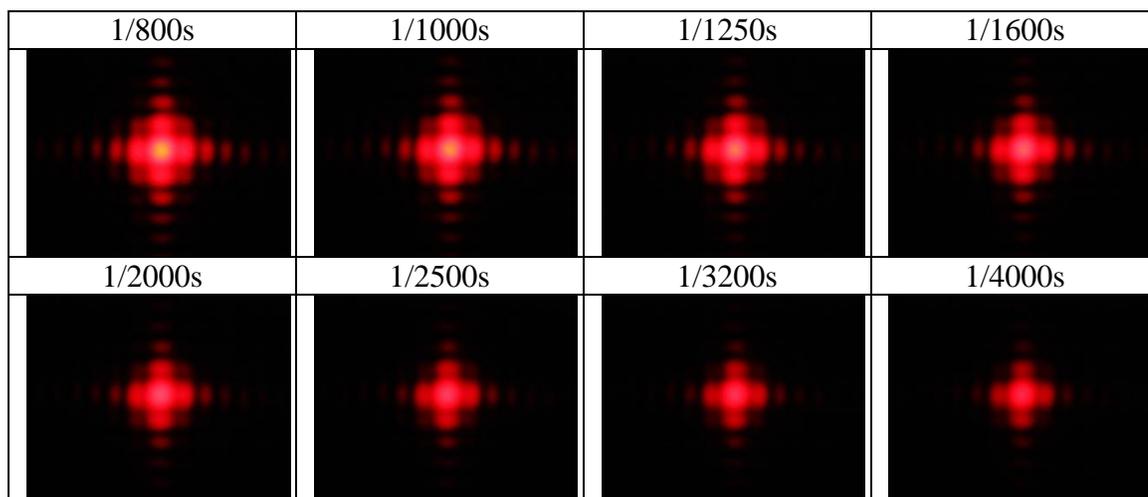
0,5m de distancia S



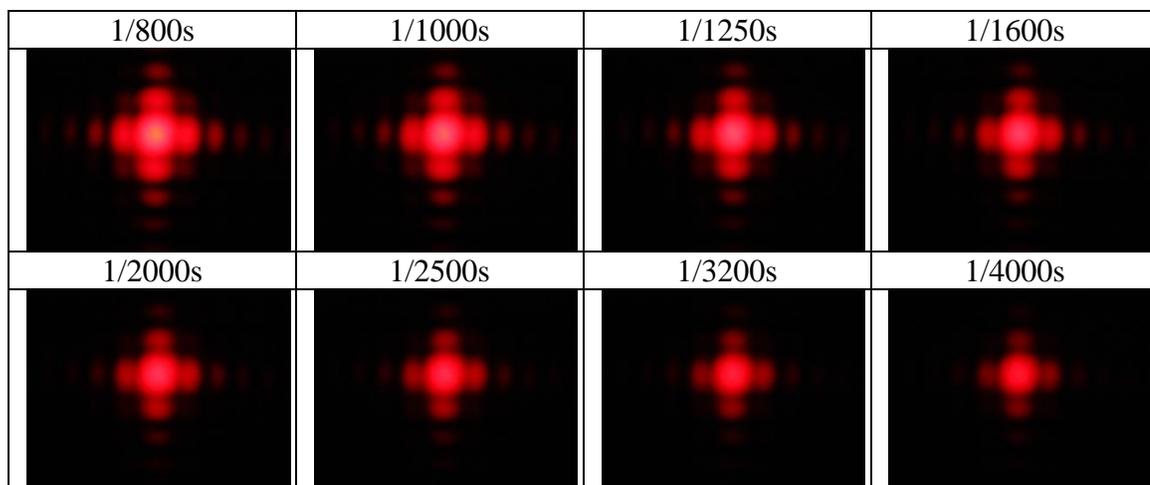
2m de distancia S



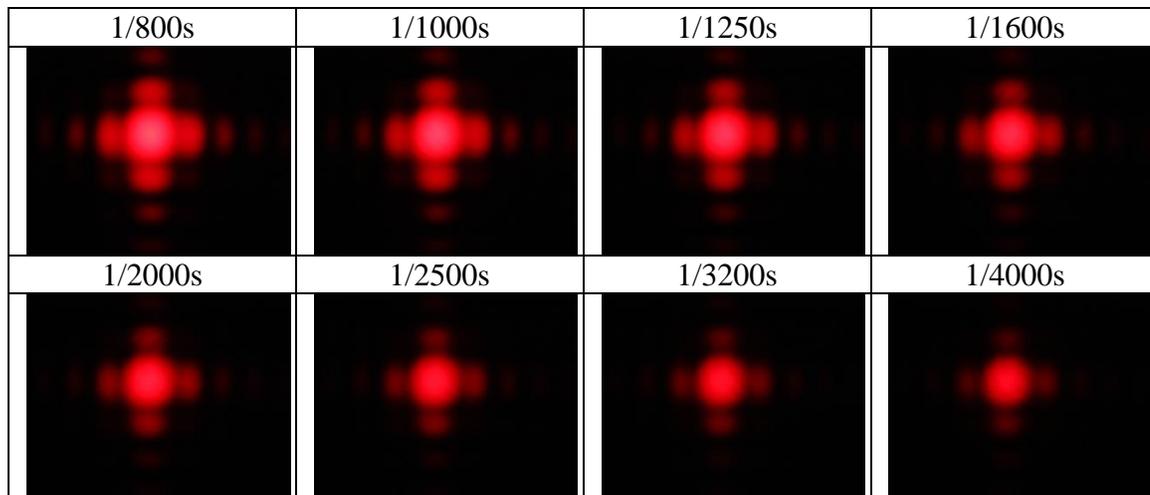
3m de distancia S



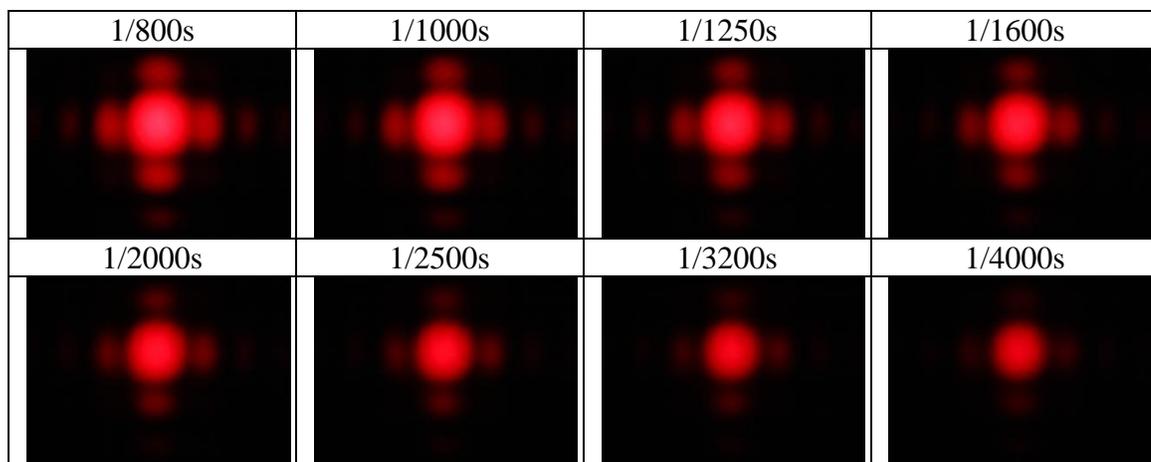
4m



5m



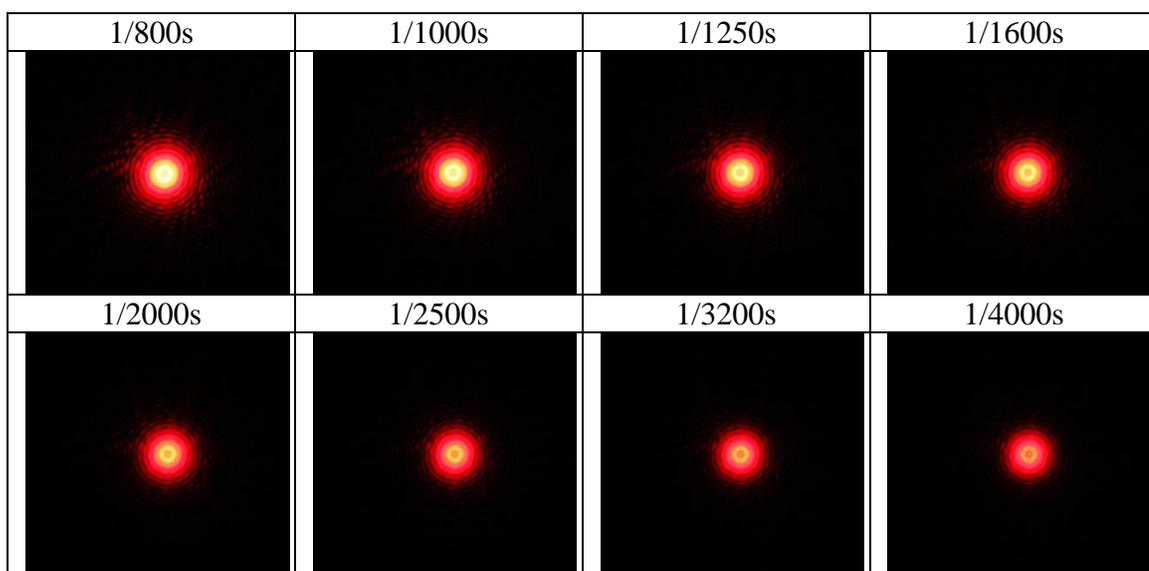
6m



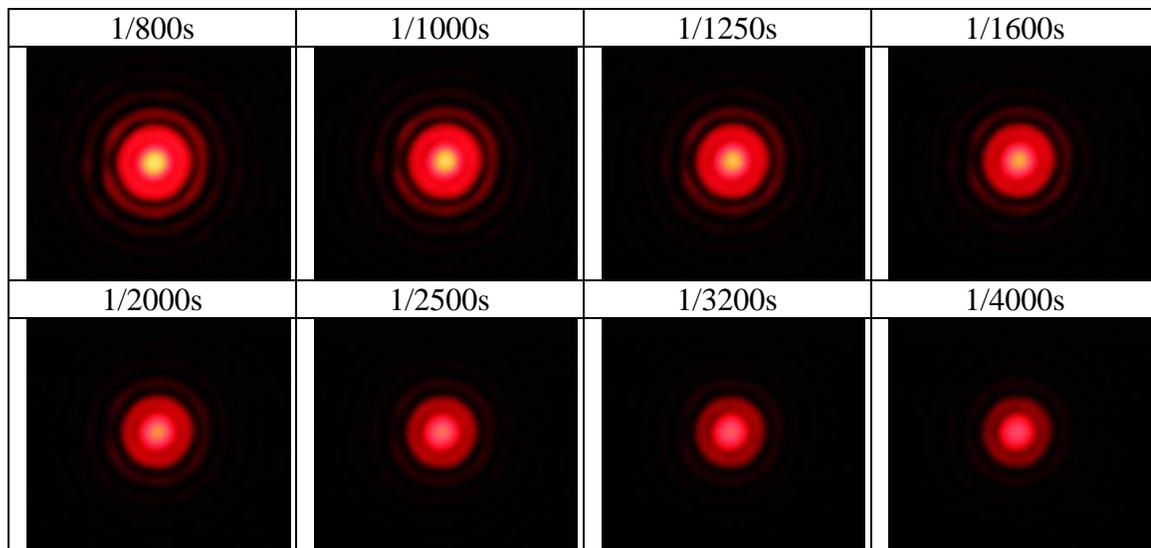
A.3. Círculo por tiempo de exposición

Serie de fotografías del haz de láser rojo, pasando por la pantalla de apertura circular de 1mm de lado, a distintas distancias S (entre la pantalla de aperturas y pantalla de interferencia).

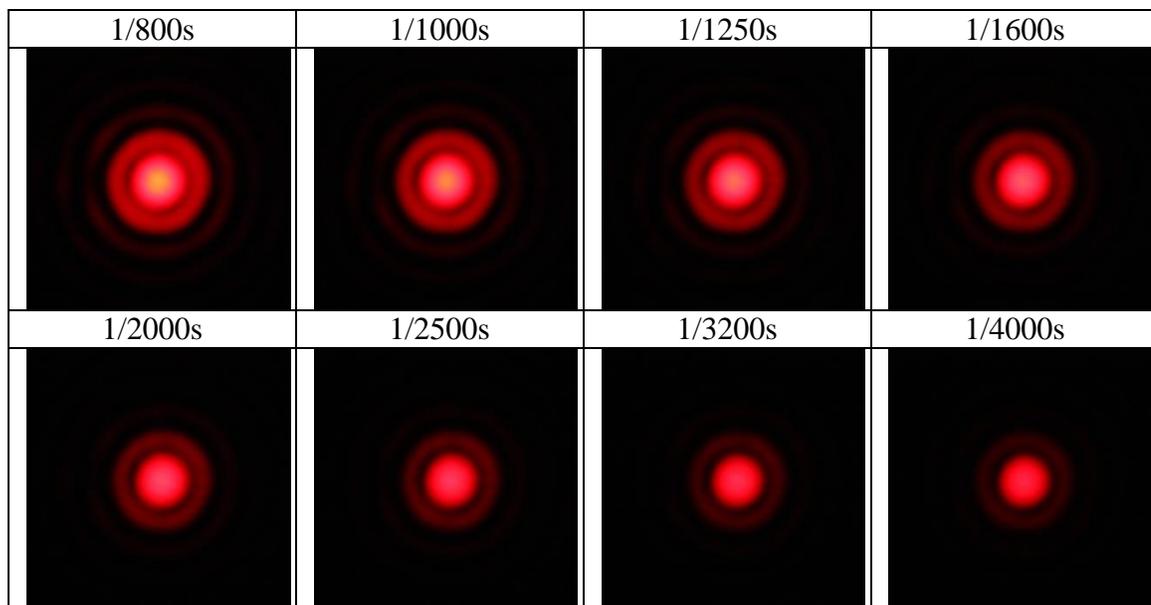
0.5m



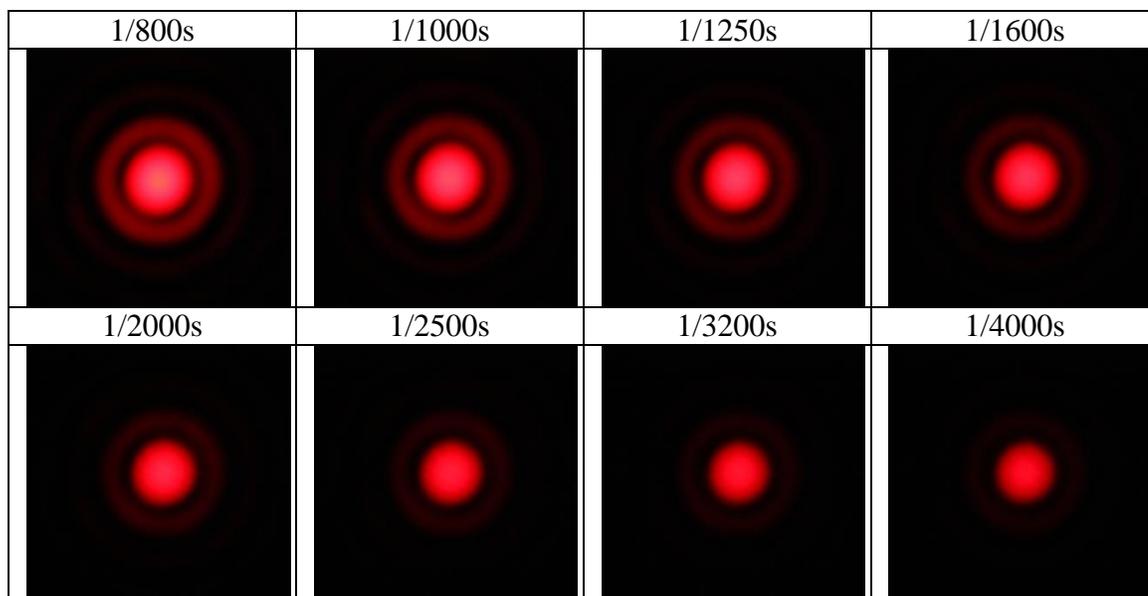
2m



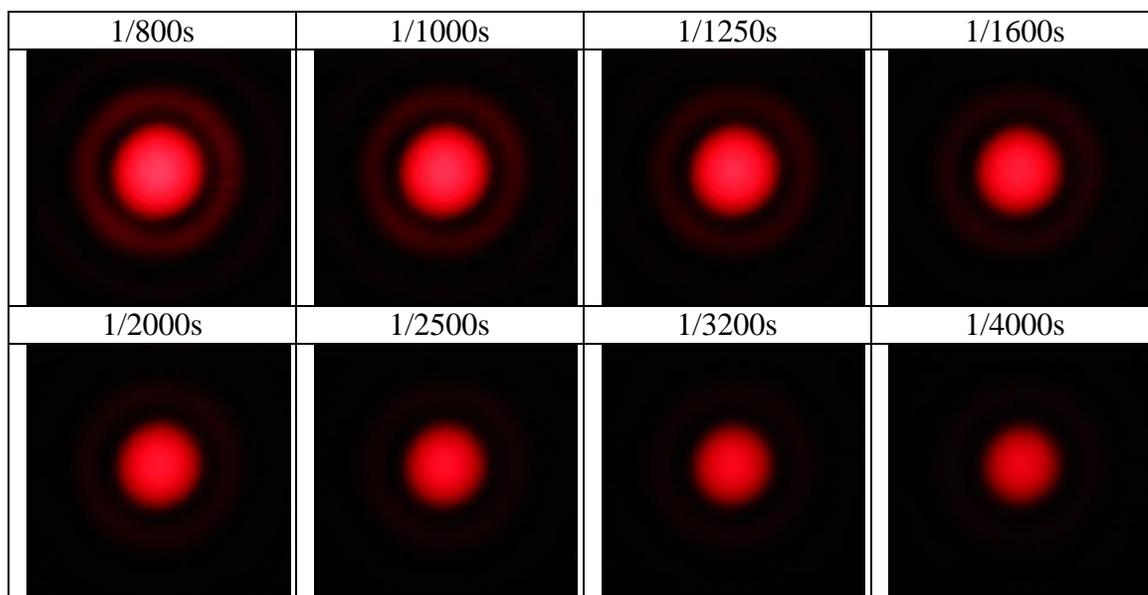
3m



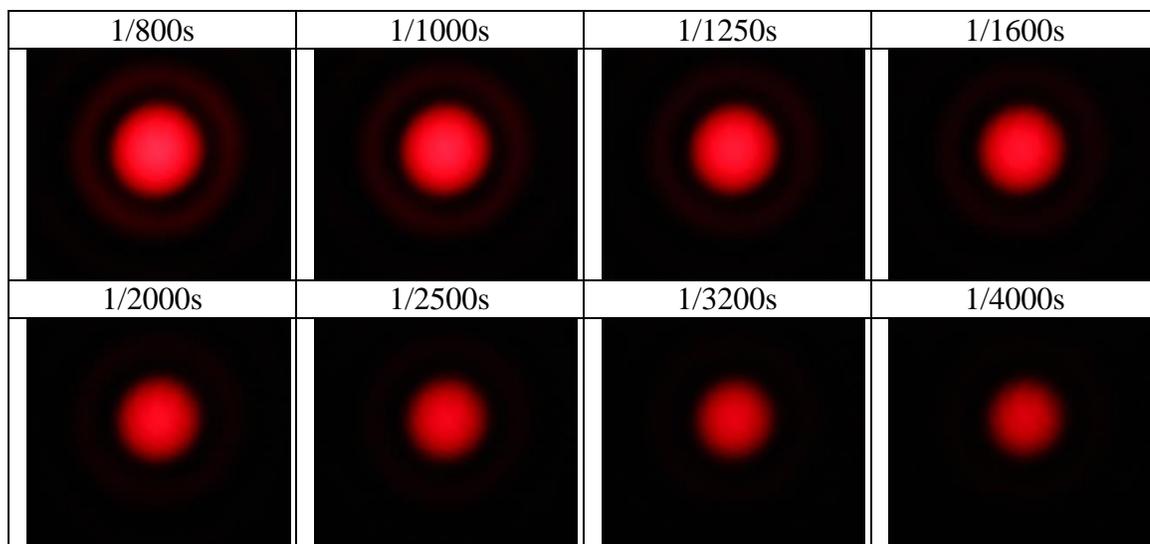
4m



5m



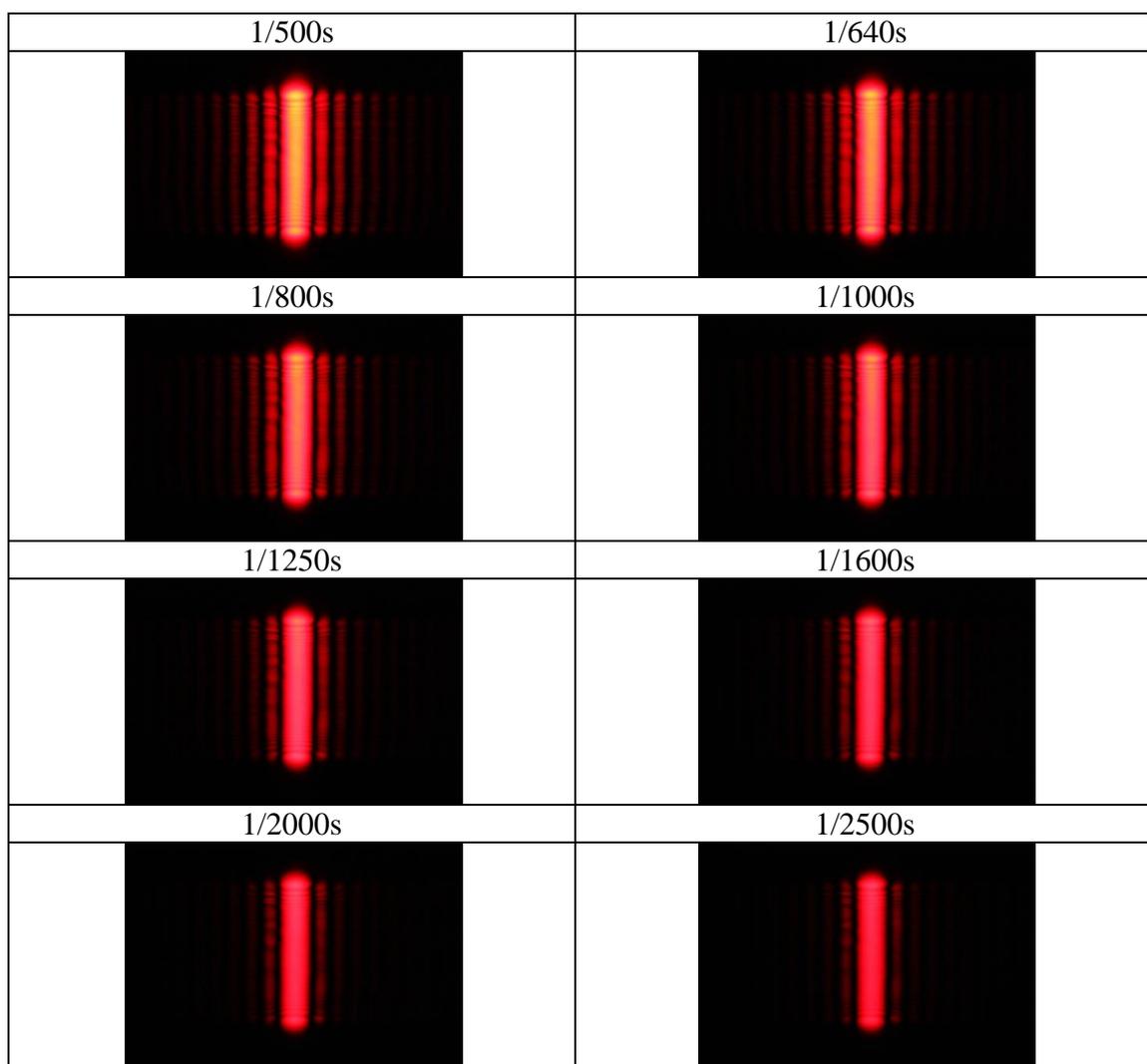
6m



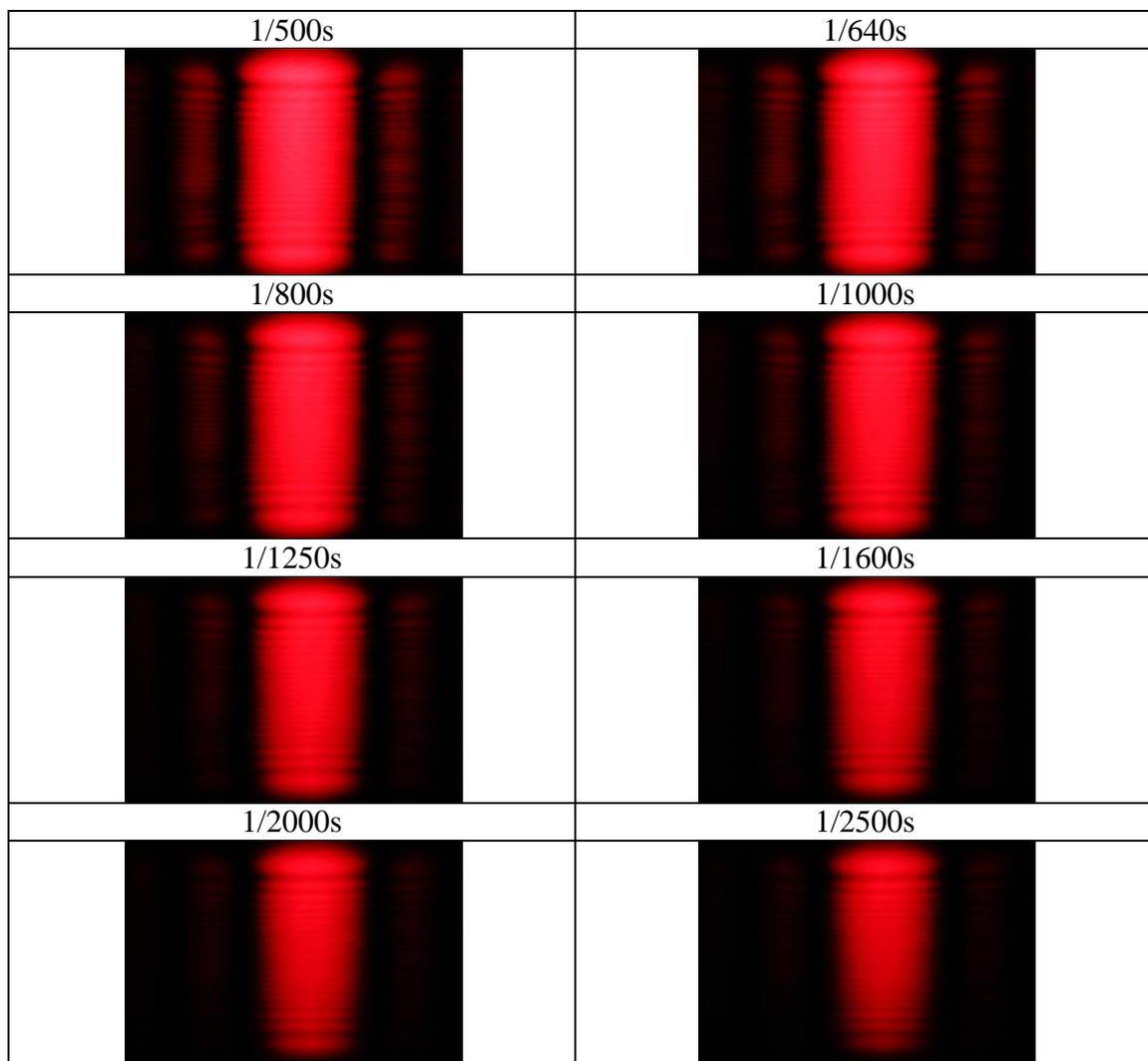
A.4. Rendijas por tiempo de exposición

Serie de fotografías del haz de láser rojo, pasando por la pantalla de apertura en forma de rendija, a distintas distancias S (entre la pantalla de aperturas y pantalla de interferencia).

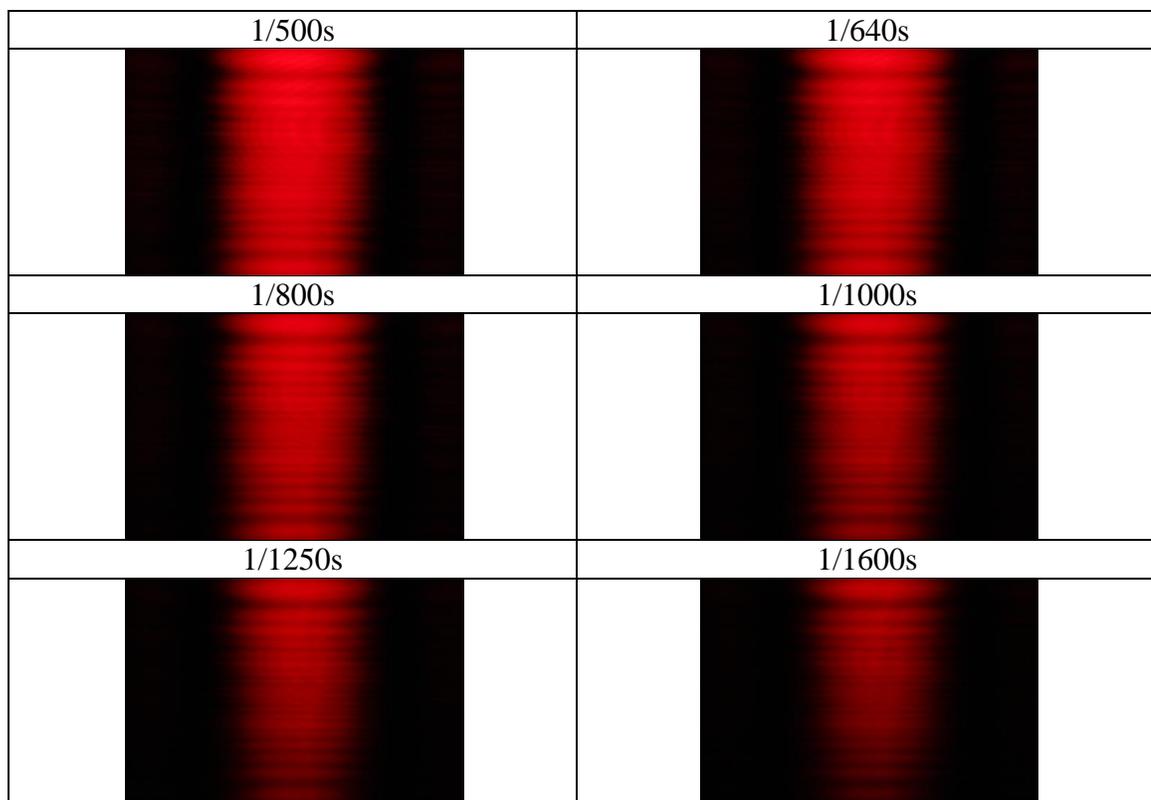
0.5m



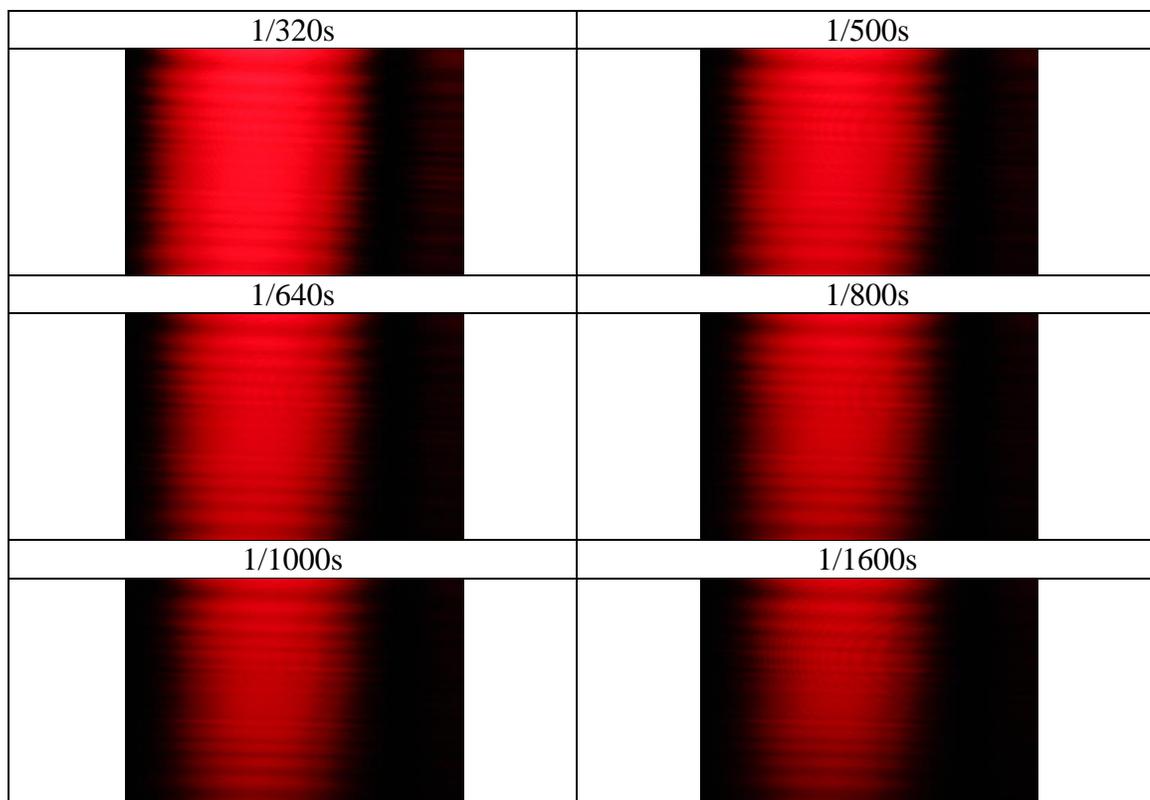
2m



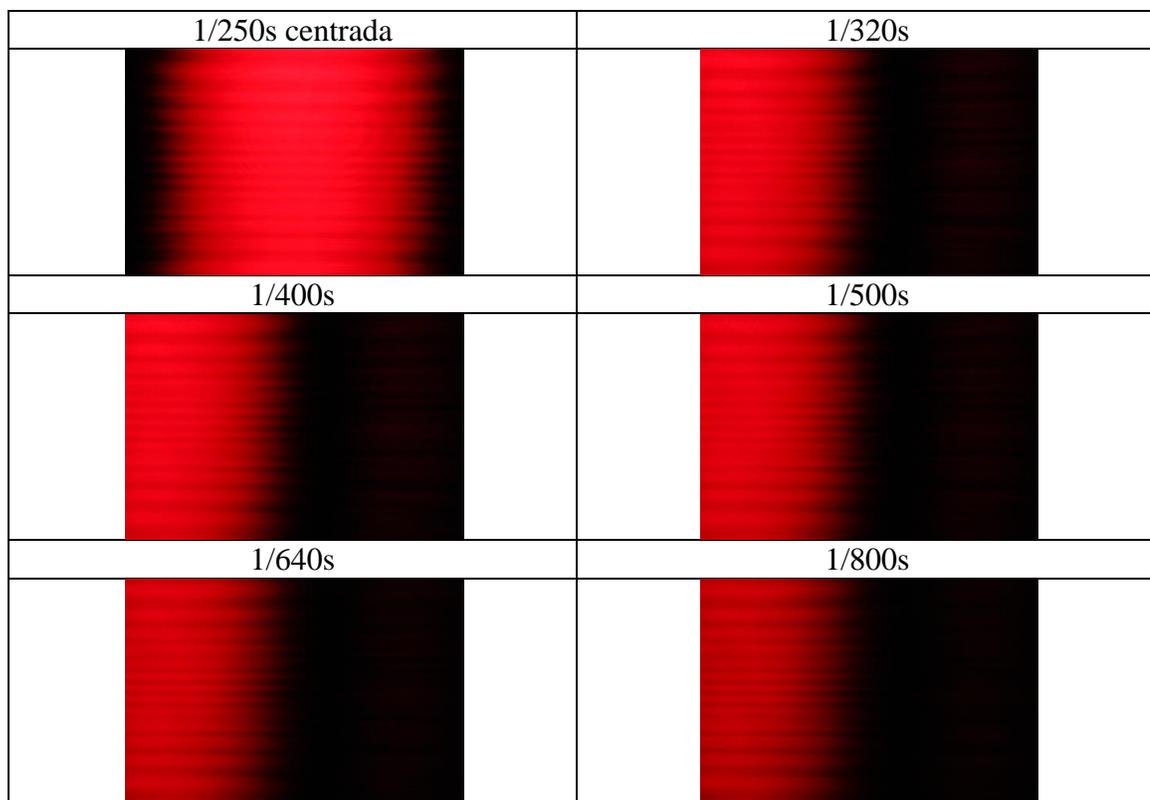
3m



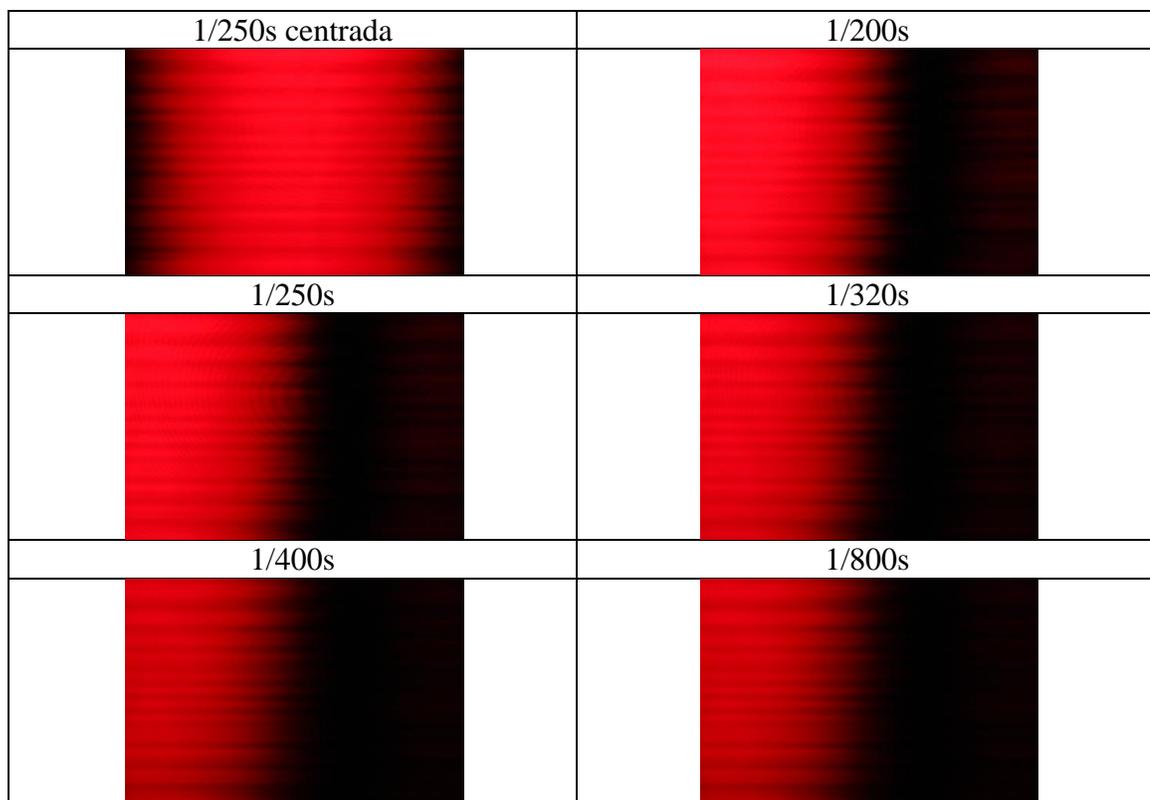
4m



5m



6m



En la distancia a 5m y 6m, la franja de difracción central es muy ancha, por ende de optó por capturar parte de la franja central y parte de la franja próxima derecha.