



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

"Estudio experimental de hologramas no lineales en películas orgánicas e inorgánicas"

TESIS

Que para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Ing. Michel Olaf Chacón Carrero

DIRECTORES:

Dr. Edgar Alvarado Méndez
Dr. José A. Andrade Lucio

Salamanca, Guanajuato,

Junio, 2025

Dedicatoria

Dedicado

A mis amados Padres y a mi patria Venezuela, en la cual juré colocar a disposición mis conocimientos adquiridos para sumar en el desarrollo de una gran nación.

¡Si la vida son dos días quiero vivirlos contigo y sólo contigo! — Simón Bolívar

La felicidad es una forma de viajar, no un destino.

Agradecimientos

A Dios Todopoderoso.

A mis amados padres, por su amor incondicional, su apoyo desde la distancia, sus enseñanzas y estar siempre presentes. Muchas Gracias.

A mi familia, por siempre creer en mí y animarme en todo momento.

A mi asesor Dr. Edgar Alvarado Méndez, por ser un guía académico excepcional, siempre presto en la práctica transcendental de la enseñanza, gracias por los conocimientos otorgados de una manera teórico-práctica eficiente, gracias por sus consejos y charlas amenas donde frecuentemente discutíamos sobre diferentes aspectos de la vida, la ciencia y la política.

Al Dr. David Camarena Martínez, quien fue mi primer contacto con la Universidad de Guanajuato, por su apoyo para emprender este camino.

Al Dr. José Andrade Lucio, el Dr. Julián Estudillo, Dr. Juan Manuel Sierra y el Dr. Roberto Rojas por aportar útiles enseñanzas que complementaron mis conocimientos.

A mis amigos Jeymar Barón, Jesús Parada, Reyna Pernia por recomendarme en que tomara esta oportunidad, por el apoyo y lucha en el inicio de esta nueva experiencia.

Al profesor José Malaguera por otorgarme los conocimientos bases para poder hoy estar aquí en esta maestría, pero sobretodo mi agradecimiento por lograr fomentar mi motivación

hacia el área de la Fotónica, ya que no tenía una motivación en mi carrera, esto me permitió elegir un trabajo que ejercía con gusto y una maestría deseada.

A mis compañeros y amigos de la promoción con la que inicié esta maestría: Julisa, Salvador, Diego y Arelis.

A la compañera Mishelle Kristine Serrano Martínez por su colaboración en el diseño de imágenes utilizadas en este trabajo de tesis.

A la Universidad Nacional Experimental del Táchira, mi alma mater en Venezuela, por mi formación profesional.

Por último y no menos importante, a la Universidad de Guanajuato, a SECIHTI y a México, por brindarme la oportunidad de aprender, y crecer académicamente viviendo esta experiencia. Muchas Gracias.

Agradecimientos Institucionales

Expreso mi más sincera gratitud hacia la Universidad de Guanajuato, especialmente a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) por la formación académica y por el apoyo financiero que he recibido durante mis estudios en esta institución.



Este trabajo de tesis fue realizado gracias al apoyo invaluable recibido a través de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI de México, bajo el CVU 1275707.



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

Índice General

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Agradecimientos institucionales	iv
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	xi
Abstract	xi
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Justificación	2
1.3 Trabajos relacionados	3

1.4	Antecedentes	4
1.5	Objetivos	6
1.5.1	Objetivo general	6
1.5.2	Objetivos específicos	6
1.6	Estructura del documento	6
2	Fundamentos	8
2.1	Espectroscopía	8
2.2	Patrón de interferencia	12
2.3	Rejillas de difracción	14
2.4	Difracción	18
2.5	Materiales dieléctricos	20
2.6	Óptica no lineal	21
2.7	Índice de refracción no lineal	23
2.8	Absorción no lineal	25
2.9	Auto-modulación de fase	26
2.10	Eficiencia de difracción	28
2.11	Modelo físico de los órdenes de difracción	28
2.12	Holografía	28
2.13	Materiales orgánicos	30
3	Metodología	34
3.1	Preparación de material fotosensible	34

3.2 Montajes utilizados	35
3.2.1 Técnica z-scan	35
3.2.2 Anillos de auto difracción	38
3.2.3 Creación de una rejilla	39
3.2.4 Medición de la eficiencia de la rejilla de difracción	42
3.2.5 Preparación de muestras fotosensibles	44
3.2.6 Materiales orgánicos utilizados	44
3.2.7 Muestra base	45
4 Resultados	47
4.1 Índice de refracción no lineal	47
4.2 Anillos de auto difracción	49
4.3 Grabación de rejillas en las muestras fotosensibles	51
4.4 Grabación de holograma	56
5 Conclusiones y trabajo futuro	58
5.1 Trabajo futuro	60
Referencias	61

Índice de Figuras

1.1	Observando la Figura 1.1. Esquema del proceso de elaboración de un holograma no lineal.	5
2.1	Un átomo de carbono, mostrando las capas K,L,M y N (orbitales atómicos) [Mazzoldi, 1978].	10
2.2	Muestra la expulsión de la capa K. La vacante es luego ocupada por un electrón de la capa L emitiendo un rayo igual a la diferencia de energía entre las capas L y K.) [Mazzoldi, 1978]	11
2.3	Franjas de interferencia.[George, 2017]	12
2.4	Deducción de la ley de Bragg.[Haddow,]	13
2.5	Un láser que pasa por una rejilla se difracta en direcciones discretas.	16
2.6	Tipos de perfil de rejillas [George, 2017].	17
2.7	Geometría de difracción de una rejilla de a) reflexión: los haces incidente y difractado se encuentran en el mismo lado de la rejilla. b) Transmisión: Los haces difractados se encuentran en el lado opuesto al haz incidente [George, 2017].	17

2.8 Geometría de difracción de una rejilla para frentes de onda planos [George, 2017].	18
2.9 Patrones de difracción de los dientes de una sierra. [Saleh and Teich, 2019].	19
2.10 Onda transmitida a través de una apertura. [Saleh and Teich, 2019].	20
2.11 Formación de dipolos en material dieléctrico.	21
2.12 Un haz láser que se enfoca y desenfoca antes y después de pasar a través de un material.	24
2.13 Procedimiento original utilizado por el físico Gabor.	29
2.14 Reconstrucción del holograma desarrollado por el físico Gabor.	30
2.15 Flavonoides. Estructura básica y tipos.[Caicedo, 2017].	32
2.16 Estructura de flavonoides destacados en hojas en hojas de moringa oleifera.[Caicedo, 2017].	33
3.1 Montaje experimental de la técnica Z-scan a)Vista superior b)Vista lateral	35
3.2 Esquema experimental para la obtención de los anillos de auto-difracción.	38
3.3 Esquemático para la grabación de la interferencia en las muestras.	40
3.4 Geometría de interferencia.	40
3.5 Interferencia en un medio no lineal.	42
3.6 Montaje para medir eficiencia con el detector de intensidad.	43
3.7 Montaje para grabación de un holograma.	43
3.8 Representación esquemática de la base.	45
4.1 Datos graficados de las pruebas de Z-Scan para el material con sus respectivos valores de concentración en alcohol y potencia (a) 0.5ml-1mW(b)0.5ml-2mW(c)0.75ml-1mW(d)0.75ml-2mW(e)Gelita Bloom [George, 2017].(f)Dicromato de potasio [George, 2017].	48

4.2 Anillos de auto-difracción obtenidos para el material orgánico a diferentes potencias de láser (a)1mW(b)10mW(c)40mW(d)50mW(e)	50
4.3 Interferencia de dos haces láser.	51
4.4 Gráficas de tiempo Vs potencia para diferentes valores de concentración del material orgánico. Imagen (a) 0.5ml de concentración, Imagen (b) 1ml de concentración, imagen (c) 1.5ml de concentración, imagen (d)2ml de concentración	52
4.5 Gráficas tiempos Vs potencia, para diferentes valores de potencia con muestras en ausencia del material orgánico.	53
4.6 Gráficas tiempo Vs potencia Gráficas obtenidas con una solución de 0.2ml del material orgánico.	54
4.7 Gráficas tiempo Vs potencia donde se compara muestras en ausencia del material orgánico Vs muestras con presencia del material orgánico.	55
4.8 Gráfica de Energía Vs Eficiencia.	56
4.9 Holograma grabado	57

Índice de Tablas

2.1	Dimensiones de los coeficientes de absorción óptica.	26
2.2	Valores medios obtenidos en hojas de Moringa oleifera.	31
3.1	Condiciones para medir el índice de refracción.	36
3.2	Parámetros para caracterizar la muestra.	36
3.3	Conceptos importantes.	37
3.4	Mecanismos principales para generar la auto-modulación de fase.	39
3.5	Concentraciones para las muestras de material fotosensible de MO.	45
3.6	Composición de la muestra MMDPG.	46
4.1	Cantidad de material utilizado para las pruebas de Z-Scan	48
4.2	Cálculo del índice de refracción y absorción no lineal.	49

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el estudio experimental de hologramas no lineales, en películas orgánicas e inorgánicas. Se muestra la relación o efecto de la susceptibilidad eléctrica (hiperpolarizabilidades) con la respuesta óptica no lineal de tercer orden en un material orgánico. Mediante esta relación será posible saber o determinar qué materiales orgánicos poseen una respuesta no lineal. En los últimos años, han demostrado ser la punta de lanza en el desarrollo de materiales semiconductores que tengan la capacidad de procesar señales con un gran ancho de banda y gran velocidad, usualmente utilizados en la industria de las telecomunicaciones, lentes bifocales, elementos holográficos ópticos, interferometría holográfica, almacenamiento óptico y hologramas en tiempo real. Nuestra investigación se basa originalmente en estudiar la estructura molecular de un material orgánico ligado con los agentes antioxidantes conocidos como flavonoides, aunado a sus valores no lineales de tercer orden, en los que se estudia el potencial de acción responsable para obtener nuevos materiales orgánicos e inorgánicos con gran competencia en la óptica no lineal, de fácil acceso y económicos. Estos materiales vinculan los principios físicos de la susceptibilidad eléctrica, tensores de tercer orden y la consecuencia óptica no lineal de sistemas orgánicos e inorgánicos. Los resultados obtenidos se comprueban realizando una película delgada utilizando gelita bloom, dicromato de potasio y el material orgánico analizado, la cual se aplicará en el grabado de una rejilla de difracción donde mediremos la eficiencia de la rejilla, con el fin de determinar qué parámetros o variables serán la clave para elevar y evidenciar las cualidades ópticas no lineales de nuestro material a estudiar, como resultado final. El enfoque de sistemas orgánicos

con propiedades ópticas no lineales abren las puertas a numerosas investigaciones en el área de la óptica, telecomunicaciones, sensores, holografía y medicina.

Palabras claves: Holografía, Óptica No Lineal (ONL),material orgánico, Elementos Ópticos Holográficos (EOH), flavonoides, tensores de tercer orden,rejillas de difracción, eficiencia de la rejilla.

Abstract

In this work the experimental study of nonlinear holograms in organic and inorganic films will be addressed. The purpose of this study is to explore the relationship or effect of electrical susceptibility (hyperpolarizabilities) on the third order nonlinear optical response in an organic material, through this relationship it will be possible to know or determine which organic materials are likely to exhibit a strong nonlinear response, through this relationship, it will be possible to know or determine which organic materials are likely to have significant nonlinear properties, which in the last years have proven to be at the forefront in the development of semiconductor materials capable of processing signals with high bandwidth and speed, usually used in the telecommunications industry, important to mention its impact on research areas such as bical lens design where the objective is to be able to control the polarization modes, last and not least but not least is the advancement in fields such as optical holographic elements, holographic interferometry, optical storage and holograms in real time. The research is originally based on studying the molecular structure of an organic material linked to the antioxidant agents known as flavonoids, together with its third order nonlinear values, in which the potential effect is responsible for obtaining new organic and inorganic materials with great potential or performance in nonlinear optics, which are easily accessible and economical. These results link the physical principles of electrical susceptibility, third order tensors and the nonlinear optical response of organic and inorganic systems. The results obtained are tested by making a thin film using gelita bloom, potassium dichromate and the organic material analyzed, which will be applied in the etching of a diffraction grating where we

will measure the efficiency of the grating, in order to determine which parameters or variables will be the key to enhance and reveal or demonstrate the nonlinear optical qualities of our material to be studied, as a final result. The approach of organic systems with nonlinear optical properties opens the doors to numerous investigations in the area of optics, telecommunications, sensors, holography and medicine.

Keywords: Holography, Nonlinear Optics (ONL), organic material, Holographic Optical Elements (HOE), flavonoids, third order tensors, Diffraction gratings, grating efficiency.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Motivación

En 1991 ya se debatía sobre la existencia de una gran variedad de materiales ONL eficaces [Eaton, 1991]. Actualmente, entre esos materiales no lineales innovadores se incluyen el grafeno y los polímeros orgánicos[Wang et al., 2019]; sin embargo la moringa se destaca como un recurso orgánico innovador. La investigación sobre la mezcla de materiales orgánicos como la moringa con compuestos inorgánicos abre nuevas posibilidades en el diseño de materiales compuestos con propiedades ópticas mejoradas. La combinación de estos dos tipos de materiales permite aprovechar lo mejor de ambos: la flexibilidad y sostenibilidad de los materiales orgánicos, junto con la estabilidad y robustez de los inorgánicos. Esta sinergia puede resultar en la creación de rejillas no lineales que poseen una eficiencia mayor; por lo tanto, la formación de rejillas no lineales con mayor eficiencia se traduce en un avance significativo en la tecnología holográfica.

Para aplicaciones de tercer orden, los materiales orgánicos pueden tener ventajas sobre los inorgánicos, tanto en magnitud de la no linealidad como en fabricabilidad. En este sentido, crece la motivación para una gran cantidad de investigación fundamental sobre materiales, ya que se

necesitan nuevos métodos de fabricación y caracterización de películas. Éstas necesidades, unidas a las continuas exigencias de comprensión de las relaciones estructura-propiedades fundamentales entre los materiales ONL, exige que los investigadores sigan buscando nuevas soluciones si se quiere desarrollar con éxito materiales para aplicaciones ONL [Eaton, 1991].

Los materiales ópticos orgánicos no lineales son muy importantes para el procesamiento de información de alta velocidad a la hora de abordar los desafíos de la reducción del consumo de energía y la mejora de la velocidad y el ancho de banda. En particular, los materiales ONL orgánicos de segundo orden son muy prometedores para cumplir con los requisitos combinados de energía ultra baja y ancho de banda ultra alto en modulación electroóptica, mientras que los materiales ONL orgánicos de tercer orden tienen un buen potencial para aplicaciones en el procesamiento de señales totalmente ópticas de ultra velocidad.

La moringa oleifera presenta propiedades ópticas no lineales, pues es sabido que los flavonoides tienen propiedades ópticas no lineales, y la moringa los contiene. Los autores [Del Coso, 2004] mencionan que los efectos ópticos no lineales de tercer orden son la base para el desarrollo de dispositivos totalmente ópticos en aplicaciones donde se necesite alta capacidad y velocidad de modulación y demodulación de señales, almacenamiento de datos ópticos y holografía en tiempo real. [Huang and Yu, 2007] indican que los materiales ópticos no lineales con gran susceptibilidad no lineal de tercer orden son indispensables para la consecución de estos dispositivos, debido a que la magnitud de estas variables depende el rendimiento del dispositivo.

1.2. Justificación

La moringa oleifera, conocida por sus múltiples beneficios nutricionales y medicinales, también posee un potencial inexplorado en el ámbito de la óptica no lineal, particularmente en lo que respecta a su no linealidad de tercer orden. A pesar de que se ha realizado numerosos estudios sobre aplicaciones biomédicas y agropecuarias de esta planta [Claver, 2023], hasta la fecha no se ha reportado específicamente su comportamiento óptico no lineal. Su rica composición química con presencia de flavonoides sugiere que podría poseer características no lineales que la harían adecuada para diversas aplicaciones en dispositivos ópticos. Investigar la no linealidad de tercer orden de la moringa podría abrir nuevos caminos en el desarrollo de materiales orgánicos sostenibles con propiedades ópticas avanzadas.

La holografía es una técnica por la cual el frente de onda de la luz proveniente de un objeto es grabado, y luego, en un segundo plano, reconstruirlo usando esta información previamente guardada. La reconstrucción del frente de onda proporciona una reproducción acertada y fiel del frente de onda original. Por lo tanto, podemos decir que la holografía puede grabar la imagen de un objeto. La característica principal de la holografía es grabar la fase de la onda entrante. Por otro lado, durante los años de 1947-1948, ya existían las condiciones teóricas y una gran parte de los materiales para la invención de los hologramas, cuando el ingeniero eléctrico húngaro Dr. Dennis Gabor creó el primer holograma de un objeto y estableció el nacimiento de la holografía [Aguilar and López, 2004]. Sin embargo, la popularidad de la holografía incrementó con la invención del primer láser; el primer láser fue construido por el físico e ingeniero Theodore Harold Maiman in 1960 [Maiman, 1960].

La holografía tiene muchas aplicaciones en diferentes campos, por ejemplo, almacenamiento de datos, cifrado óptico, interferometría holográfica, microscopía y holografía dinámica, esta última, debido a su gran capacidad para modelar el frente de onda[Yao et al., 2021].

Los autores Pengcheng Chen et al en[Chen et al., 2023] establecieron que, en los últimos años, el holograma no lineal se ha convertido en una tecnología prometedora para incrementar las aplicaciones de la óptica no lineal.

Sin embargo, un problema en la holografía es la eficiencia de grabado. M. Gutiérrez et al [Gutiérrez et al., 2016]. Investigaron la eficiencia de grabado de materiales, tales como foto polímeros y gelatina dicromatada, ellos obtuvieron una máxima eficiencia de difracción de 23 % en hologramas de fase.

Actualmente, existe una amplia variedad de materiales orgánicos, que tienen propiedades ópticas no lineales y son buenos candidatos para la construcción de rejillas de difracción, para su posterior uso en holografía, reduciendo así los costos y la complejidad de los procesos de obtención.

1.3. Trabajos relacionados

La importancia de estudiar materiales orgánicos con propiedades ópticas no lineales, radica en que algunos de ellos presentan flavonoides. Debido a la estructura de los flavonoides, éstos se pueden sintetizar en las plantas y participan en la fase de la fotosíntesis, durante la cual catalizan el transporte de electrones. La susceptibilidad es la respuesta óptica no lineal

de un material, inducida por el desplazamiento de cargas generado por un campo eléctrico externo, cuando el campo eléctrico aplicado es de alta intensidad, la respuesta del material o su polarización dejará de ser lineal P.Innocenzi [[Innocenzi and Lebeau, 2005](#)]. Por consiguiente se deduce que los materiales con gran magnitud en sus variables de susceptibilidad son de gran importancia para el desarrollo de dispositivos semiconductores como: moduladores y demodulares de gran rapidez y capacidad usualmente utilizados en las redes de comunicación, limitadores ópticos, almacenamiento de datos ópticos y holografía en tiempo real.

Ahora bien, utilizaremos la combinación de material orgánico con gelatina dicromatada y combinaciones químicas de compuestos como 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPTMS) para la obtención de materiales híbridos fotosensibles, mediante la cual podremos aprovechar la alta eficiencia NLO (No Lineal Óptica) de las moléculas orgánicas del material utilizado, esto debido a que lamentablemente los materiales orgánicos para aplicaciones ópticas, sufren degradación al estar expuestos al medio ambiente y a la luz.

A partir de la obtención de materiales híbridos fotosensibles, que le otorgan robustez a los materiales orgánicos, se convertirán en las rejillas de difracción de las cuales se obtendrán los órdenes de difracción que finalmente permitirán caracterizar la eficiencia de la rejilla, y por consiguiente permitirnos generar discusiones acerca de la alta eficiencia NLO (No Lineal Óptica) del material orgánico investigado.

1.4. Antecedentes

La holografía ha demostrado ser un método importante para el procesamiento de información óptica, básicamente registra la amplitud y la fase de la luz en un holograma. La holografía ha hecho posible el uso de las propiedades ópticas de la luz como la amplitud, fase y polarización [[Chen et al., 2023](#)].

Por otro lado, los materiales no lineales pueden ser elaborados y caracterizados para aplicaciones fotónicas y ópticas [[Chen et al., 2023](#)]. En trabajos previos [[G.Arguello, 2022](#)] se han utilizado materiales inorgánicos tales como polímeros, polímero NOA (Norland Optical Adhesive) y dicromato de potasio; estos materiales tienen características importantes para la holografía. Marinescu [[Marinescu, 2018](#)] presentó la síntesis de las más importantes clases de compuestos orgánicos ópticos no lineales, incluyendo polímeros, fullerenos, mencionando que son económicos, poco tóxicos y fáciles de procesar en solución; por lo tanto, su aplicación

como materiales NLO está incrementando. Alguno de los materiales orgánicos ya estudiados en [G.Arguello, 2022] por ejemplo: gelatina de pescado, genciana, Jamaica (Hibiscus Sabdariffa), son muestras de los diferentes materiales orgánicos, estos materiales orgánicos podrían ser apropiados para la registración y reconstrucción de hologramas no lineales.

En el esquema de la figura 1.1. Se muestra una concepción de cómo fabricar hologramas no lineales en películas orgánicas e inorgánicas. Como primer paso, se realiza una caracterización óptica no lineal de los materiales o medios; fundamentalmente, se determina el índice de refracción no lineal y la absorción no lineal.

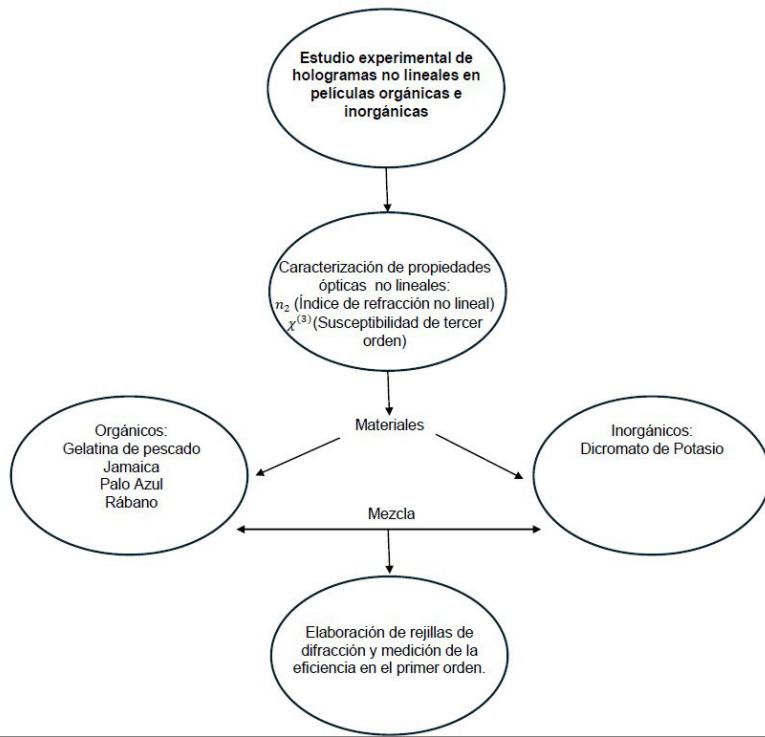


Figura 1.1. Observando la Figura 1.1. Esquema del proceso de elaboración de un holograma no lineal.

Los medios pueden ser orgánicos como: gelatina de pescado, jamaica, palo azul entre otros, o inorgánicos como el dicromato de potasio, líquido iónico, líquido tricatiónicos entre otros, la mezcla de un orgánico e inorgánico es usada para elaborar rejillas de difracción y así caracterizar su eficiencia.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Aumentar la eficiencia de la formación de una rejilla de difracción mediante propiedades ópticas no lineales de los materiales.

1.5.2. Objetivos específicos

I. Elaboración de películas hechas de gelatina orgánica, medios orgánicos no lineales y materiales inorgánicos.

II. Determinación de propiedades ópticas no lineales con la técnica de Z-scan a diferentes potencias.

III. Caracterización experimental de las rejillas no lineales midiendo su eficiencia.

IV. Formar hologramas de fase en medios no lineales.

1.6. Estructura del documento

Capítulo I. Se expone la motivación del trabajo, así como su justificación y antecedentes, estableciendo los objetivos planteados para el alcance del mismo.

Capítulo II. Se presentan los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo, como lo son la óptica no lineal, las rejillas de difracción, absorción no lineal, automodulación de fase, material orgánico y el concepto de la holografía.

Capítulo III. Se describen los arreglos experimentales utilizados en cada una de las etapas de la investigación.

Capítulo IV. Se presentan y discuten los resultados obtenidos en cada parte de los diferentes objetivos específicos; así como su relevancia.

Capítulo V. Se incluyen las observaciones y conclusiones que se obtuvieron en el proyecto,

así como las futuras aportaciones que se puedan implementar a partir de esta investigación.

CAPÍTULO 2

Fundamentos

Para iniciar este capítulo se presentan una serie de fundamentos básicos que permitan comprender el trabajo desarrollado en esta tesis. En la siguiente sección iniciaremos con espectroscopía debido a que la base de un holograma es la rejilla de difracción y su inicio fue la espectroscopía.

2.1. Espectroscopía

El primer estudio formal acerca de la radiación solar fue realizado por Isaac Newton en 1672. Su principal aporte consistió en la observación de la separación de colores debido a las diferencias en el índice de refracción del prisma en función del color. En el siglo XVIII, W. Herschel y J. Ritter descubrieron que el espectro se extiende más allá de la franja visible, en el infrarrojo y la ultravioleta, respectivamente. En la misma época, el científico Thomas Young, utilizando una rejilla de transmisión, logró identificar las longitudes de onda de diferentes colores, convirtiéndose en la primera investigación donde se utilizó una rejilla como medio para un descubrimiento [Dartora et al., 2011]. Sin embargo, no fue el primero en observar el fenómeno, ni estudió las rejillas de forma profunda.

En [Mazzoldi, 1978] discuten que al interaccionar los fotones con la materia, encontramos que los fotones tienen un alto poder de penetración al no tener carga ni masa; dicho parámetro también es dependiente de la longitud de onda debido a su relación inversamente proporcional con la energía del fotón. Desde un punto de vista macroscópico, cuando un haz de fotones atraviesa un material, se reduce el número de fotones (o cantidad de energía). Desde un punto de vista microscópico veremos los procesos elementales de interacción de los fotones con los átomos y sus distintas probabilidades en función del número atómico y de la energía.

Cuando un haz de rayos X o gamma penetra en un material, se observa una desaparición progresiva de los fotones que lo constituyen. Esta disminución del número de fotones incidentes, denominada atenuación, se debe a la interacción de cierto número de ellos con los átomos que componen el medio. En la interacción de un fotón con un átomo, parte de la energía del fotón se transfiere a un electrón que sale proyectado con una cierta energía cinética. El electrón consume esta energía, produciendo ionizaciones de los átomos del medio [Mazzoldi, 1978]. Así, parte de la energía del fotón incidente es absorbida por el medio. Otra parte de la energía es igual o inferior y cuya dirección que es distinta, son los fotones transmitidos.

Cuando bombardeamos un material con fotones, el material responde con una radiación de electrones, fotones e iones, cada una de las anteriormente enunciada se conocen como: electrones (ESCA) otorgan información química, fotones (XRF) Fluorescencia X, excitada con fotones y finalmente Iones (IONI). Los efectos básicos producidos por una radiación de fotones, pueden ser estudiados en términos de cambios en la radiación emitida por el material y cambios en el material; los cambios en la radiación emitida por el material tenemos: La energía, dirección de movimiento, carga, ionización y especies (electrones, fotones, iones); ahora los cambios en el material pueden ser: Temperatura, propiedades o estructura atómica. El más importante de estos cambios se refiere naturalmente a la radiación emitida por el material, porque este es el material de los métodos de investigación [Mazzoldi, 1978].

Para nuestro caso de estudio con espectroscopía, utilizamos la técnica similar a la fluorescencia de rayos X (XRF), únicamente cambiarán los rayos X por rayos UV e infrarrojos. Esta es una técnica ampliamente utilizada en el análisis elemental. Se basa en el principio de qué los electrones internos de un átomo, al ser bombardeados con radiación de alta energía, como los rayos X, son expulsados. El átomo se relaja emitiendo fotones de longitudes de onda características, que se utilizan para identificar el elemento.

Ahora nos preguntamos, ¿cómo funciona XRF? Un átomo estable está formado por un núcleo en el que orbitan los electrones. Los distintos niveles de energía “unen” distintas

cantidades de electrones en sus respectivas "capas".

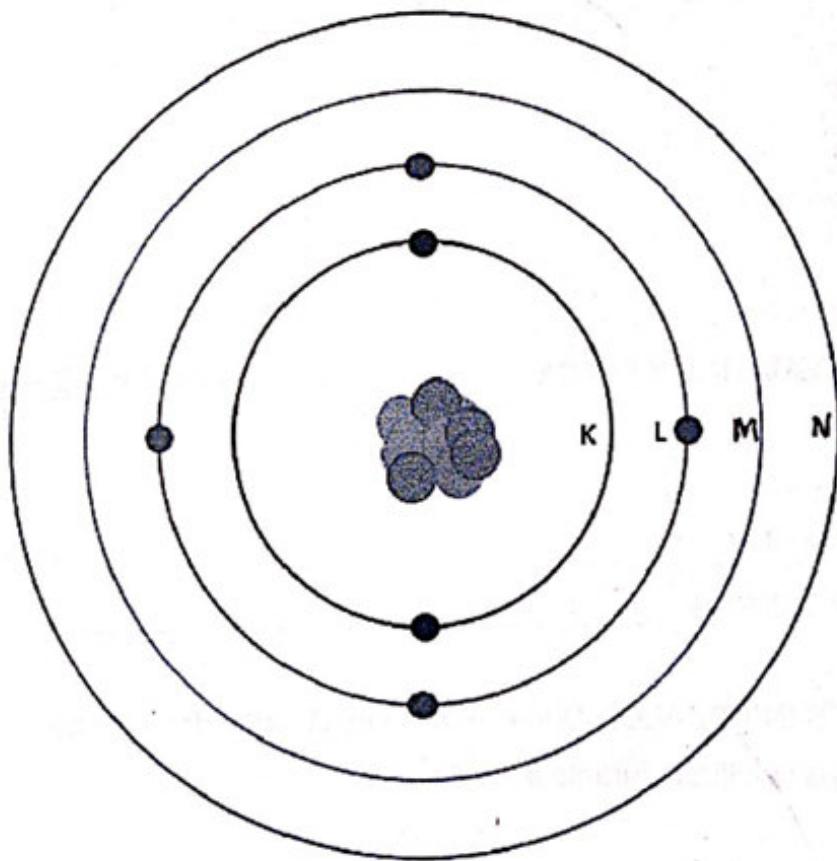


Figura 2.1. Un átomo de carbono, mostrando las capas K,L,M y N (orbitales atómicos) [Mazzoldi, 1978].

Cuando una onda de rayos X supera la energía de enlace de una capa electrónica interna, un electrón se desprende y es expulsado. El átomo en su conjunto recupera la estabilidad al reemplazar este espacio vacío con otro electrón de una capa orbital de mayor energía. Se libera un rayo X fluorescente a medida que este electrón reduce su nivel de energía para migrar a la capa interna. Detectamos esa fluorescencia de rayos.

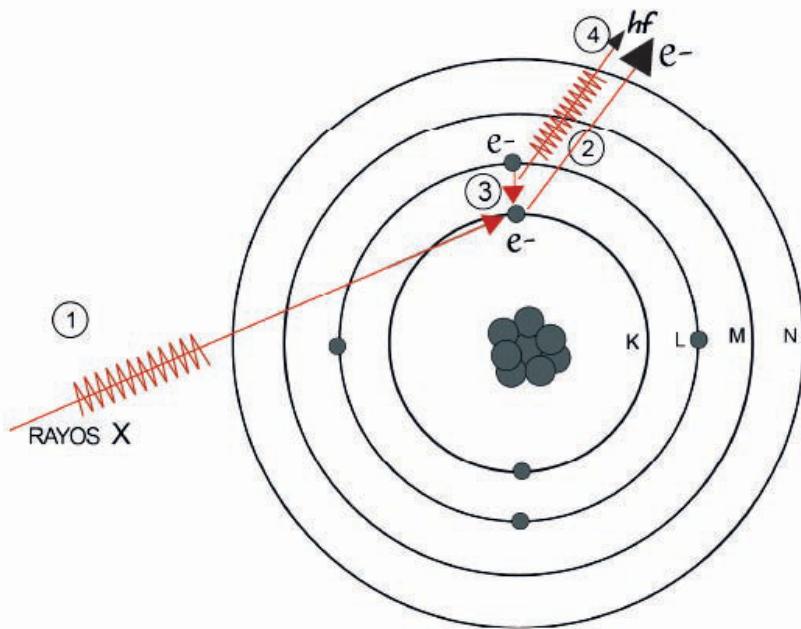


Figura 2.2. Muestra la expulsión de la capa K. La vacante es luego ocupada por un electrón de la capa L emitiendo un rayo igual a la diferencia de energía entre las capas L y K.) [Mazzoldi, 1978]

La energía liberada en esta transición equivale a la diferencia de niveles de energía entre estos dos estados cuánticos del electrón, capa antigua y capa nueva. Finalmente, de esta última interacción, podremos identificar fotones emitidos o absorbidos pertenecientes a longitudes de ondas características o inclusive medir la energía en eV de esa diferencia de capas

que interactúan.

El primer estudio formal acerca de la radiación solar fue realizado por Isaac Newton en 1672. Su principal aporte consistió en la observación de la separación de colores debido a las diferencias en el índice de refracción del prisma en función del color. En el siglo XVIII, W. Herschel y J. Ritter descubrieron que el espectro se extiende más allá de la franja visible, en el infrarrojo y la ultravioleta, respectivamente. En la misma época, el científico Thomas Young, utilizando una rejilla de transmisión, logró identificar las longitudes de onda de diferentes colores, convirtiéndose en la primera investigación donde se utilizó una rejilla como medio para un descubrimiento. Sin embargo, no fue el primero en observar el fenómeno, ni estudió las rejillas de forma profunda.

2.2. Patrón de interferencia

Es posible crear una rejilla de difracción aplicando interferencia de dos haces de luz. Es necesario cumplir el siguiente escenario. Cuando dos ondas planas monocromáticas, coherentes y colimadas de igual longitud de onda e igual intensidad se interceptan, un patrón de onda estacionario se forma en la región de la intersección.

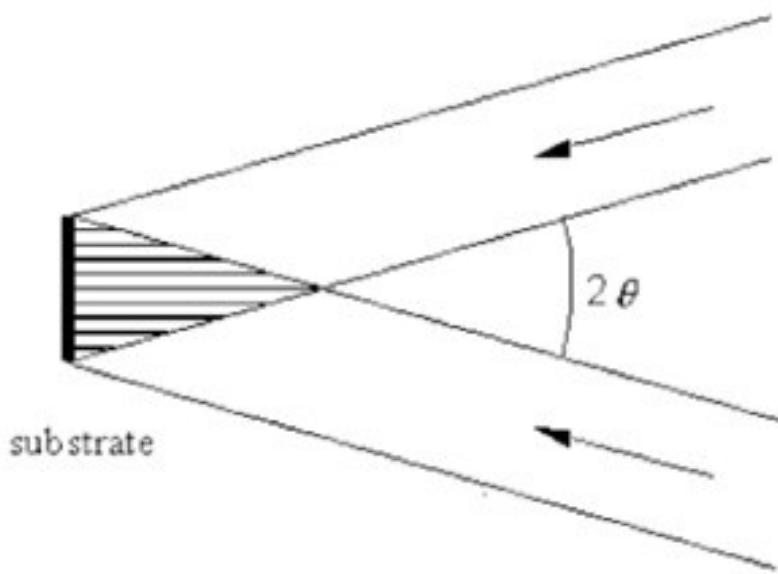


Figura 2.3. Franjas de interferencia.[[George, 2017](#)]

Basado en el trabajo de [George, 2017] el patrón de interferencia está formado por una distribución sinusoidal de intensidades, creándose franjas igualmente espaciadas de zonas oscuras y claras. Si se registrara dicho patrón de interferencia en una placa fotosensible, quedarían registradas franjas, ya que las zonas con alta intensidad dejarían la placa expuesta al máximo, mientras que las placas con baja intensidad no experimentarían ningún cambio, y las demás zonas quedarían parcialmente expuestas. En caso de que las intensidades de los dos haces fueran parcialmente diferentes, la intensidad mínima dejaría de ser nula y tomaría el valor de dicha diferencia, disminuyendo el contraste en la placa. Para [Haddow,] el espaciamiento entre las franjas estará dado por la ley de Bragg, la cual establece que la suma de los segmentos FG y GH corresponde a un número entero n de longitudes de onda λ .

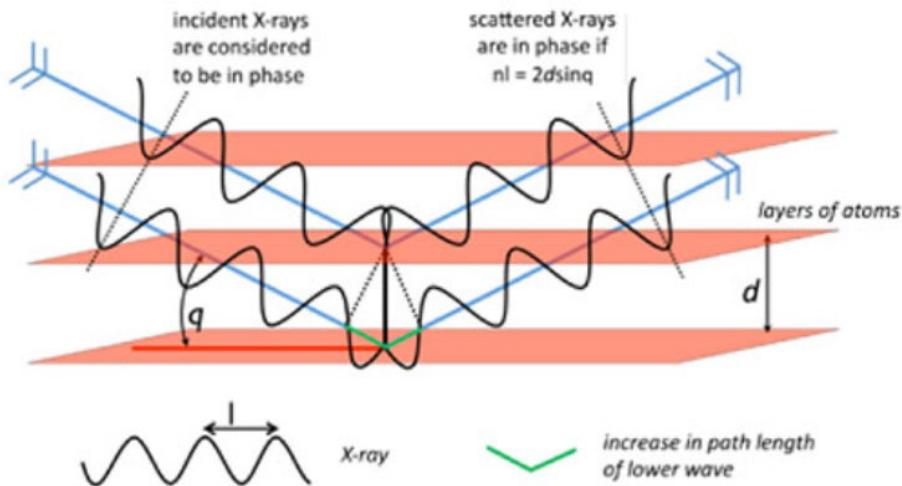


Figura 2.4. Deducción de la ley de Bragg.[Haddow,]

$$FG + FH = \eta\lambda \quad (2.1)$$

Pero $FG=GH$, y $\operatorname{sen}\theta=FG/d$ es decir:

$$FG = d\operatorname{sen}\theta \quad (2.2)$$

De esta forma, la Ecuación 2.1. Se convierte en:

$$d = \frac{\eta\lambda}{2\operatorname{sen}\theta} \quad (2.3)$$

en donde θ es la mitad del ángulo entre los dos haces; pudiéndose intuir que un pequeño cambio

en el ángulo produce un cambio en el espaciamiento y, por ende en el periodo del patrón de interferencia. También es posible apreciar que el límite para el espaciamiento entre franjas es de la mitad de la longitud de onda, y sabiendo que las longitudes de onda visibles son del orden de los nanómetros, miles de franjas por milímetro podrían ser formadas.

En las rejillas holográficas, la interferencia puede ser grabada en diferentes materiales fotosensibles, en los cuales las uniones moleculares pueden fortalecerse o debilitarse debido a la exposición a la luz. Los materiales fotosensibles responden de forma diferente de acuerdo a la longitud de onda de la luz de exposición, debido a esto es de considerar qué láser escoger para grabar la interferencia, ya que, entre más sensible a la longitud de onda utilizada, se necesitará menos tiempo de exposición y por ende menos energía será utilizada en el proceso.

Las placas fotosensibles comerciales generalmente son expuestas a un proceso químico posterior a la exposición de la interferencia, disolviendo ya sea las partes expuestas a la luz (Materiales positivos) o las partes que no fueron expuestas o tuvieron menor exposición a la luz (Negativas). Esta técnica se conoce como litografía holográfica.

La generación de una rejilla holográfica de buena calidad requiere que los instrumentos se encuentren estables, así como no estar expuestos a vibraciones exteriores, además de componentes ópticos como espejos, lentes, monturas, entre otros. La luz del ambiente debe ser eliminada para que la interferencia no sea afectada y se mantenga lo más pura posible. Es importante tener en cuenta que los factores ambientales como temperatura y humedad afectan los resultados, ya que el índice de refracción de los materiales cambia con estos parámetros.

Otros factores que pueden influir en la calidad de las rejillas, es la uniformidad del material donde se graba, procurando obtener igual grosor a lo largo del espacio grabado. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que cada material puede tener diferentes tiempos de exposición para llegar a una eficiencia adecuada, lo cual puede ser desde horas hasta segundos.

Finalmente debido a que una rejilla es nuestro objetivo en esta tesis, en la siguiente sección se presenta un mecanismo de formación de rejillas mediante interferencia.

2.3. Rejillas de difracción

Es difícil señalar otro dispositivo que haya aportado más información experimental importante a todos los campos de la ciencia que la rejilla de difracción. El físico, el astrónomo, el

químico, el biólogo, el metalúrgico, todos lo utilizan como herramienta rutinaria de insuperable exactitud y precisión, como detector de especies atómicas para determinar las características de los cuerpos celestes y la presencia de atmósferas en los planetas, para estudiar las estructuras de moléculas y átomos, finalmente para obtener mil y una informaciones sin las cuales la ciencia moderna se vería enormemente perjudicada.[\[Palmer and Loewen, 2005\]](#)

La rejilla de difracción es un elemento difractivo útil para analizar fuentes de luz; está compuesta por un gran número de rendijas paralelas igualmente espaciadas. Una rejilla de difracción no es más que una pantalla que difracta la luz mediante un gran número de rendijas paralelas equidistantes.

Las primeras rejillas de difracción se fabricaban con hebras de alambre. Sus efectos parecían a lo que se puede apreciar cuando se ve una tela a través de una pluma cercana al ojo. Las mejores rejillas tienen una gran cantidad de líneas o ranuras finas, sobre superficies de vidrio o metal.

En la óptica, la rejilla de difracción es un componente óptico con un patrón regular, que divide la luz en varias partes que viajan en diversas direcciones para posteriormente interferir en un punto. Con un patrón fino de líneas negras se forma una rejilla simple de baja frecuencia.

La primera rejilla de difracción fue realizada en 1785 por el astrónomo David Rittenhouse, la cual consistió en una rejilla con 53 aperturas en un ancho de media pulgada. Sin embargo, no hay evidencia de que haya sido utilizado en experimentos de carácter científico.

El primer científico que investigó las rejillas de difracción fue Joseph Von Franhofer en 1821. Su trabajo tuvo relevancia en el estudio de la espectroscopía, observando el comportamiento de altos órdenes y algunos efectos de polarización. Estudió el proceso de construcción de las rejillas, llegando a obtener una alta precisión, adicionalmente, intuyó una asociación entre la eficiencia y la forma de las ranuras. Sus rejillas eran del tamaño de una pulgada, es decir, 25 mm, con ranuras espaciadas en $3\mu\text{m}$. Las rejillas cobran en la actualidad un rol muy importante en el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Algunos científicos consideran que las rejillas han aportado información experimental en todos los campos de la ciencia, como en Física, Química, Biología, Astronomía, Metalurgia, como una herramienta de precisión y exactitud insuperables, útil para detección de especies atómicas presentes en planetas, para estudio de estructuras de moléculas y átomos, entre otros.

En [\[George, 2017\]](#) discuten que en el desarrollo de las rejillas han sido divididas de acuerdo a diferentes parámetros como su geometría, su manufactura, su uso, algún parámetro

de estudio o el rango del espectro donde son utilizadas; debido a esto, se tienen muchos tipos como por ejemplo de amplitud, fase, holográficas, litográficas, simétricas, de transmisión, de reflexión, planas, cóncavas, dieléctricas, metálicas, entre muchas otras. Entre las diferencias más básicas se encuentran los tipos de rejillas de amplitud y de fase, en las cuales simplemente ejerce un cambio en el parámetro que se le asocia, es decir, las rejillas de amplitud cambian la amplitud de la luz que pasa a través de ella, mientras que en el otro caso cambia es la fase, sin embargo, cabe mencionar que pueden existir rejillas que hagan un cambio en ambos parámetros.

Como se dijo anteriormente una rejilla está compuesta por una serie de elementos de transmisión (La luz se transmite) o reflexión (La luz se refleja) separados una distancia comparable con la longitud de onda de la luz que interacciona con ella; por lo que se pueden establecer las rejillas de transmisión y reflexión, difractando la luz en otro lado o en el mismo lado de la luz incidente.

Cuando se tiene luz monocromática que incide sobre la superficie de una rejilla, ésta se difracta en direcciones discretas, ver Figura 2.5. Cada ranura puede ser vista como una pequeña fuente de luz difractada, que combinadas forman un frente de onda difractado.

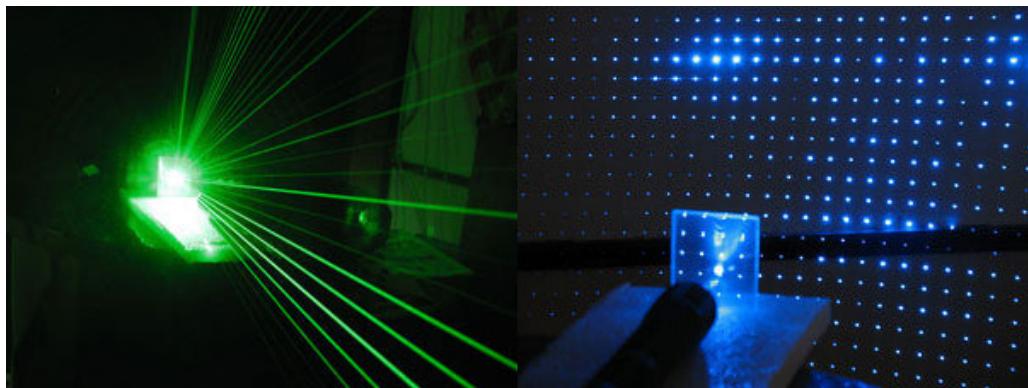


Figura 2.5. Un láser que pasa por una rejilla se difracta en direcciones discretas.

Los ángulos de los órdenes de difracción dependen de las características de la rejilla, como lo son la distancia entre ranuras (formando un periodo), la forma del perfil de la rejilla, ver Figura 2.6. La geometría de la difracción debido a una rejilla puede ser visualizada en la Figura 2.7, donde un haz de luz de longitud de onda λ , que incide a un ángulo α (Mayor a 0), es difractada en los ángulos B_m ($B_0 < 0, B_1 > 0, B_{-1} < 0$) por la rejilla de distancia de ranura “d”. Los ángulos son medidos desde la normal, perpendiculares a la rejilla.

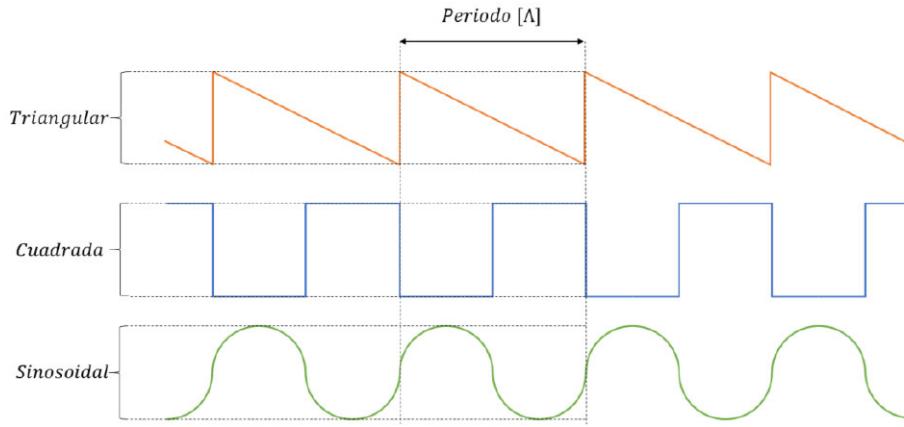


Figura 2.6. Tipos de perfil de rejillas [George, 2017].

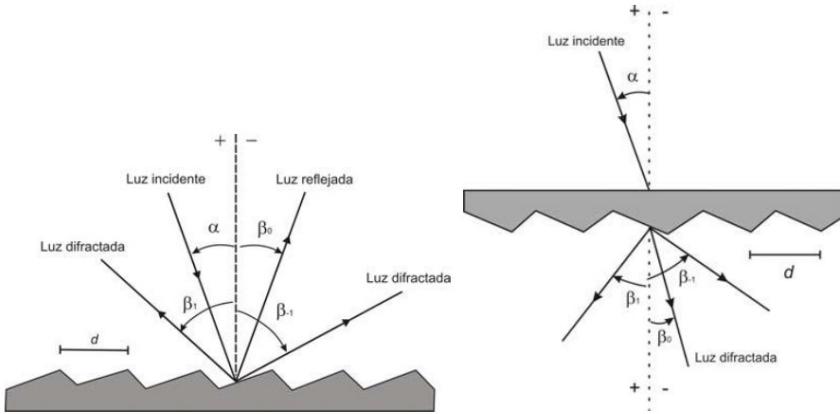


Figura 2.7. Geometría de difracción de una rejilla de a) reflexión: los haces incidente y difractado se encuentran en el mismo lado de la rejilla. b) Transmisión: Los haces difractados se encuentran en el lado opuesto al haz incidente [George, 2017].

Si se observa la geometría equivalente de difracción de rejillas usando ángulos planos, la diferencia de trayectoria geométrica entre la luz de las ranuras adyacentes se ve como $d(\sin \alpha + \sin \beta)$, tomando los ángulos como positivos. Ver Figura 2.8.

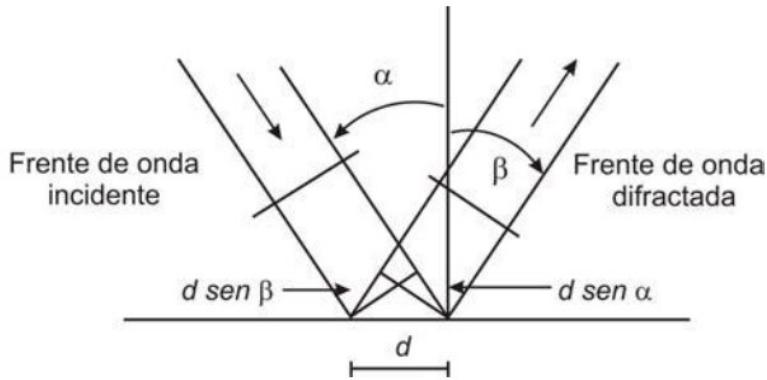


Figura 2.8. Geometría de difracción de una rejilla para frentes de onda planos [George, 2017].

Teniendo en cuenta la diferencia de camino óptico descrita entre la luz incidente y difractada, se producen máximos de intensidad, cada múltiplo entero de la longitud de onda [Bass, 1995] , por lo que se tendría:

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (2.4)$$

Para una longitud de onda particular λ , todos los valores de m que cumplan con $\left|\frac{m\lambda}{2}\right| < 2$ corresponden a órdenes de difracción físicamente realizables. Adicionalmente, debido a la simetría presente en un rayo incidente y reflejado, los ángulos α y β se hacen iguales, por lo tanto, tomando $\alpha = \beta = \vartheta$, se tiene:

$$m\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.5)$$

2.4. Difracción

Cuando una onda óptica se transmite a través de una abertura en una pantalla opaca y recorre cierta distancia en el espacio libre, su distribución de intensidad se denomina patrón de difracción [Saleh and Teich, 2019]. Si la luz se tratara como rayos, el patrón de difracción sería una sombra de la apertura. Sin embargo, debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, el patrón de difracción puede desviarse ligera o sustancialmente de la sombra del diafragma, dependiendo de la distancia entre la abertura y el plano de observación, la longitud de onda

y las dimensiones de la abertura. Un ejemplo se ilustra en la Figura 2.9. Es difícil determinar exactamente la manera en que la pantalla modifica la onda incidente, pero la propagación en espacio libre más allá de la abertura se rige siempre por las leyes descritas en [Saleh and Teich, 2019].

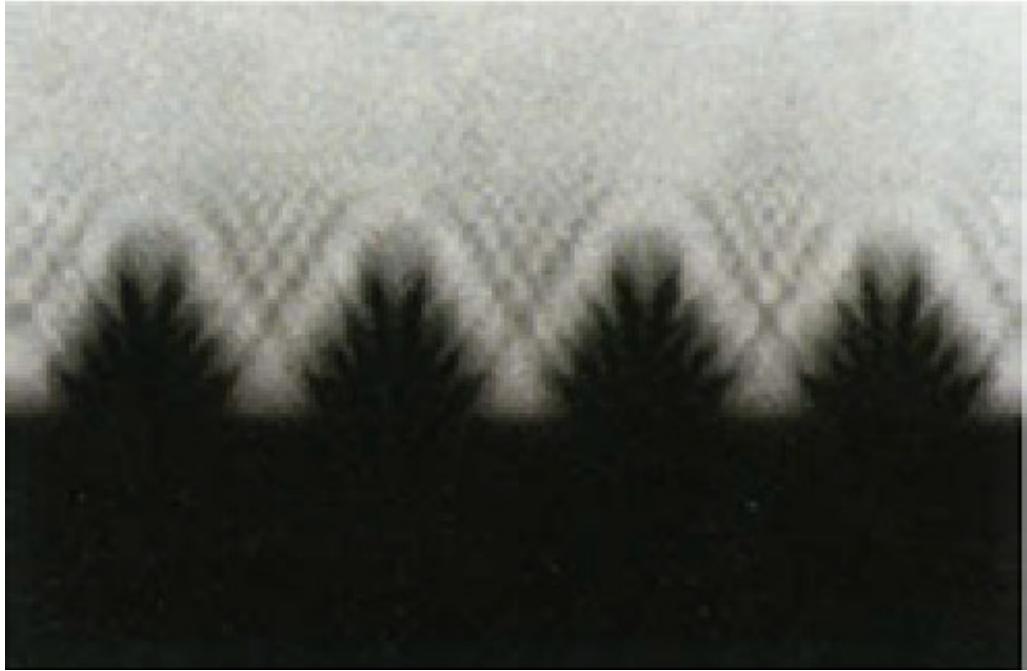


Figura 2.9. Patrones de difracción de los dientes de una sierra. [Saleh and Teich, 2019].

La teoría más simple de la difracción se basa en la suposición de que la onda incidente se transmite sin cambios en puntos dentro de la abertura, pero se reduce a cero en puntos de la parte posterior de la pantalla opaca. Si $U(x, y)$ y $f(x, y)$ son las amplitudes complejas de la onda inmediatamente a la izquierda y a la derecha de la pantalla, figura 2.10, respectivamente, entonces de acuerdo con esta suposición.

$$f(x, y) = U(x, y) \cdot p(x, y) \quad (2.6)$$

donde:

$$p(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{dentro } \rightarrow \text{de } \rightarrow \text{la } \rightarrow \text{apertura} \\ 0 & \text{fuera } \rightarrow \text{de } \rightarrow \text{la } \rightarrow \text{apertura} \end{cases} \quad (2.7)$$

se denomina función de apertura.

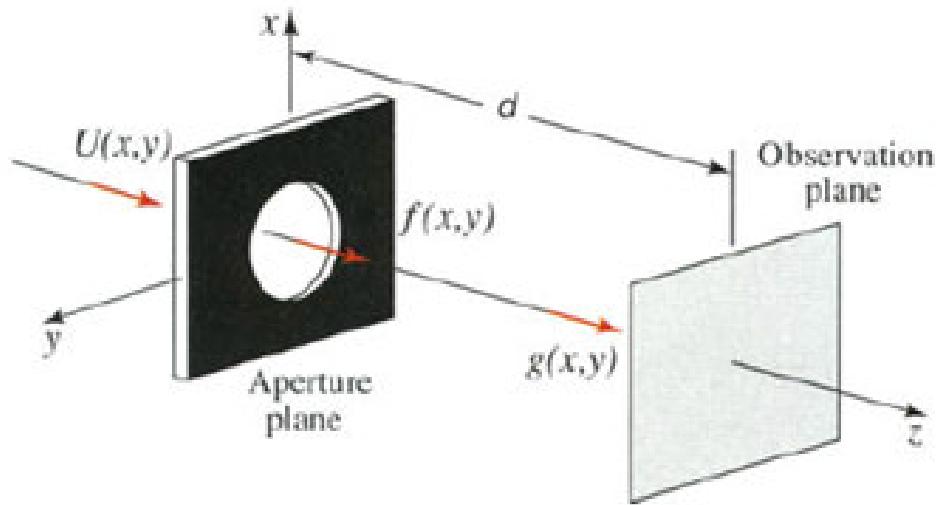


Figura 2.10. Onda transmitida a través de una apertura. [Saleh and Teich, 2019].

La interacción de la potencia con la rejilla se interpreta con amplitudes en la transformada de Fourier en el 1 orden. Un estudio detallado de la transformada de Fourier puede encontrarse en [González, 1997] Ahora bien. Dada $f(x, y)$, la amplitud compleja $g(x, y)$ en un plano de observación a una distancia "d" de la pantalla puede determinarse utilizando los métodos descritos en las Secciones. 4.1 y 4.2. del [Saleh and Teich, 2019]. El patrón de difracción $I(x, y) = |g(x, y)|^2$ se conoce como difracción de Fraunhofer o difracción de Fresnel, dependiendo de si la propagación en el espacio libre se describe utilizando la aproximación de Fraunhofer o la aproximación de Fresnel, respectivamente; Fresnel se utiliza para campo cercano mientras Fraunhofer aplica para campo lejano. Aunando mayor información sobre la Figura 2.10, se hace referencia de [Goodman, 2015] Es idóneo mencionar que nosotros no realizamos un estudio detallado de la difracción no lineal, porque es un trabajo experimental. Se deja para un trabajo a futuro el desarrollo teórico que incluya la distribución de la intensidad en un medio no lineal.

2.5. Materiales dieléctricos

Los materiales dieléctricos son claves en la consecución de efectos no lineales debido a la formación de dipolos que permanecen estáticos a diferencia de un material conductor (donde los electrones permanecen en movimiento), allí la diferencia para determinar por qué se usan

los materiales dieléctricos en la óptica no lineal.

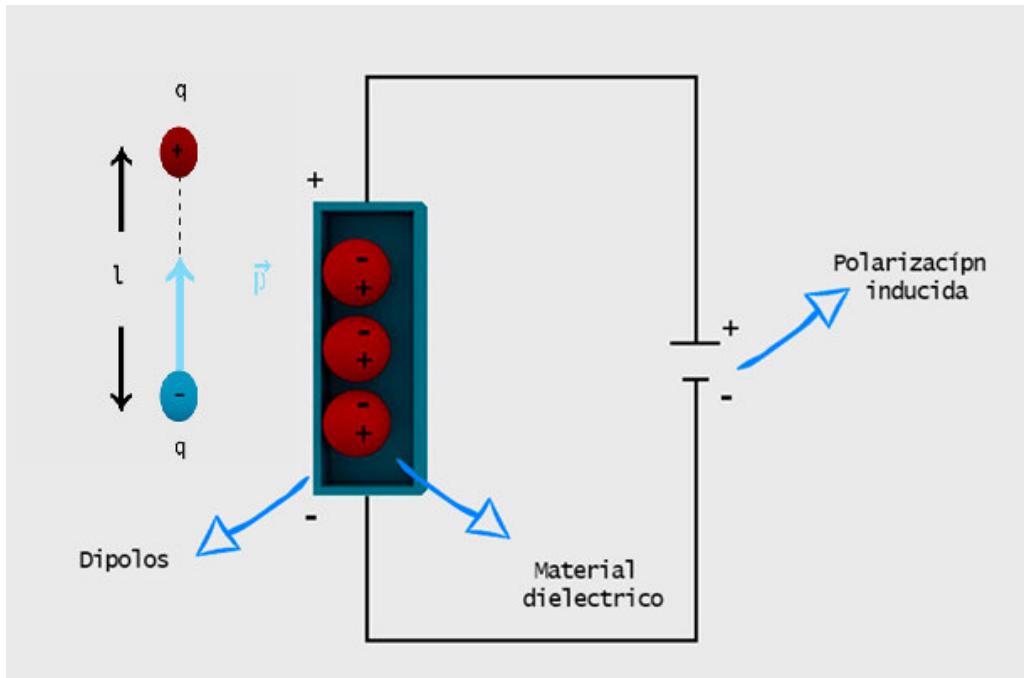


Figura 2.11. Formación de dipolos en material dieléctrico.

$$\sum \frac{P_i}{V} = P \quad (2.8)$$

donde 2.8. es la polarización del material.

2.6. Óptica no lineal

La óptica no lineal puede entenderse de manera simple, como el resultado de la interacción radiación-materia bajo la presencia de un campo eléctrico intenso. Para explicar la óptica no lineal, primeramente, habrá que comprender qué es la óptica lineal.

Los fenómenos ópticos lineales son aquellos en los que las propiedades ondulatorias de la luz no son modificadas, es decir, no cambia la frecuencia o la longitud de onda. Estos fenómenos lineales se presentan con luz de intensidad moderada o baja. Las interacciones más comúnmente experimentadas de la luz con la materia, por ejemplo: la reflexión y la difracción, se producen en el dominio lineal. Es decir, la magnitud del efecto observado varía linealmente

con la intensidad de la luz [Patra et al., 2012].

Matemáticamente, la polarización lineal inducida, es proporcional al campo eléctrico en materiales dieléctricos, siempre y cuando se tengan intensidades pequeñas, o que el campo eléctrico inducido en un material sea de baja intensidad [Motiei et al., 2017] .

$$\vec{P}_L = \epsilon_0 \cdot \chi^{(1)} \cdot \vec{E} \quad (2.9)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío y $\chi^{(1)}$ es la constante de susceptibilidad.

Si se incrementa la intensidad o el campo eléctrico, entonces se genera lo no linealidad, que se observa típicamente solo a intensidades de luz muy altas y coherentes, cuando el campo eléctrico de la luz es $> 10^8 V/m$ y, por lo tanto, comparable al campo eléctrico atómico de $\sim 10^8 V/m$. Este campo externo oscilatorio aplicado, provocará una oscilación de los electrones de un material [Innocenzi and Lebeau, 2005] y matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{P} = \chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E} \vec{E} + \chi^{(3)} \vec{E} \vec{E} \vec{E} + \dots \quad (2.10)$$

La susceptibilidad χ es una propiedad intrínseca de un medio que responde a la luz; Los términos de susceptibilidad son generalmente tensores, lo que significa que el medio es sensible a la orientación de los campos de entrada. Un efecto de segundo orden es asociado con $\chi^{(2)}$, un tercer orden con $\chi^{(3)}$ y así sucesivamente. Dentro de la ecuación 2.10. encontramos la presencia del segundo armónico, el cual se puede definir como un proceso coherente no lineal de segundo orden en el que dos fotones de menor energía se convierten hacia arriba, emitiendo un fotón exactamente al doble de la frecuencia de la fuente de excitación incidente.

Los fenómenos del tercer orden son más débiles que los efectos del segundo orden, pero son muy importantes por dos razones: primero, se presentan en materiales con centro de simetría, es decir, sus lados están centrados, por ende, son centro-simétricos, algunos fenómenos del tercer orden son: mezcla de cuatro ondas degeneradas y no degeneradas, efecto Kerr, absorción de dos fotones y dispersión de Raman y Brillouin. En [George, 2017]

El fenómeno físico que involucra este trabajo de tesis de tercer orden es el cambio en el índice de refracción llamado Kerr. El efecto Kerr óptico es una birrefringencia inducida ópticamente debido al índice de refracción no lineal del material. El efecto Kerr está directamente relacionado con la polarización de tercer orden, donde el cambio en el índice de refracción es proporcional a la intensidad óptica, por lo tanto, el índice de refracción no solo dependa de la frecuencia, sino también de la intensidad.

2.7. Índice de refracción no lineal

La manifestación más común de la refracción no lineal surge de la susceptibilidad no lineal de tercer orden, el llamado efecto Kerr óptico. Este índice puede ser entendido si se considera que la propagación de un haz intenso de luz en un material está acompañada por la orientación de las cargas eléctricas a lo largo del campo eléctrico. En este caso, el índice de refracción es linealmente proporcional a la irradiancia (I) de un haz de luz monocromática [George, 2017], como se muestra en la Ecuación 2.11.

$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + n_2 \langle E^2 \rangle = n_0 + n_2 I \quad (2.11)$$

donde n_0 es el índice de refracción lineal independiente de la irradiancia y n_2 es el coeficiente del índice de refracción no lineal. Dado que n es una cantidad adimensional, n_2 debe estar en unidades de *Area/Potencia*. Como hemos comentado anteriormente, existe una relación entre n_2 y $\chi^{(3)}$ [Liu et al., 2001],[Numan et al., 2022],[Paschotta, 2006]. En MKS unidades. Ver Ecuación 2.12.

$$\Delta_n = n_2 I = \frac{R_e \chi^{(3)}}{\epsilon_0 4 n^2 c} I \quad (2.12)$$

donde R_e denota la parte real de $\chi^{(3)}$ [Paschotta, 2006]. En cgs unidades. Ver Ecuación 2.13.

$$\Delta_n = \frac{1}{2} n_2 |E^2| = \frac{4\pi^2 R_e \chi^{(3)}}{n^2 c} I \quad (2.13)$$

donde \vec{E} es el campo oscilante de un rayo láser.

Para la Ecuación 2.11 existe gran diversidad de fenómenos físicos que se rigen por esta expresión matemática, aunado a que existen igualmente diferentes experimentos para observarlos, mediante diferentes montajes para analizar la no linealidad.

Es importante subrayar que, cuando un rayo láser excita electrones de su estado base a estados de mayor energía, permanecen un tiempo en ese estado. Si el tiempo es mayor al de excitación, el cambio del índice de refracción persiste más allá, del tiempo de duración del láser. En estas situaciones, el modelo de refracción no lineal sugerido por las ecuaciones anteriores es inexacto. No se puede obtener la refracción no lineal a partir de un simple análisis algebraico.

El cambio del índice de refracción conlleva un cambio en la fase. Si se tiene un haz de luz, que pasa a través de un material de espesor d , ver Figura 2.12, el cambio de fase puede

definirse como:[[Bass, 1995](#)].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int_0^d \Delta n(z, I) dz \quad (2.14)$$

donde λ_0 , es la longitud de onda del haz de luz, z , es la distancia de propagación del campo (las variaciones del índice de refracción dependen de z) y d , es el grosor de la muestra.

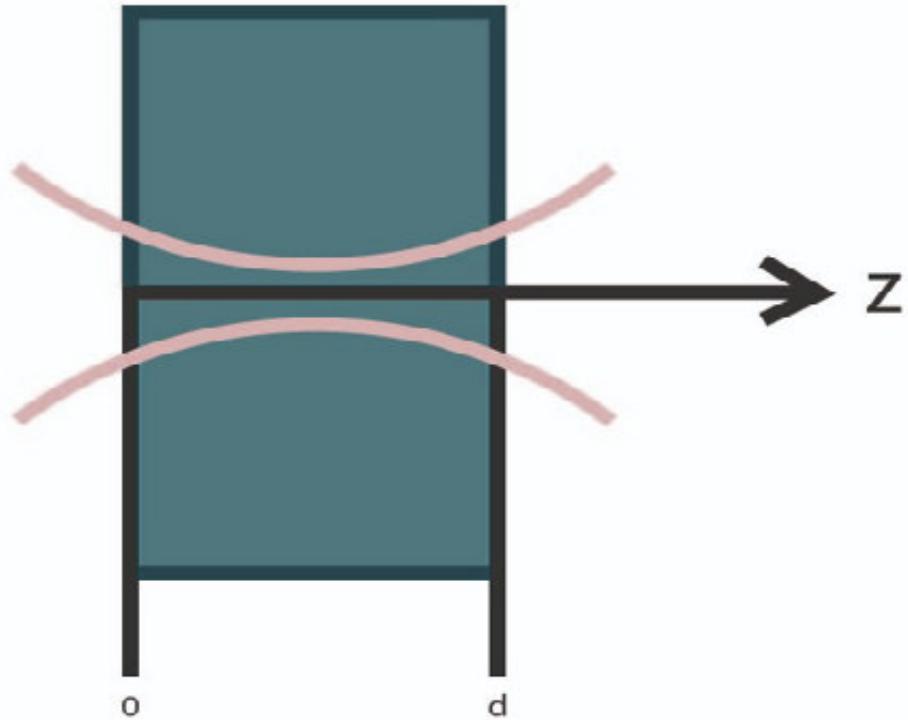


Figura 2.12. Un haz láser que se enfoca y desenfoca antes y después de pasar a través de un material.

Para muestras delgadas [[George, 2017](#)]. Ver Ecuación 2.15, puede ser descrita como:

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 I d \quad (2.15)$$

Para finalizar esta sección se logra observar una relación entre el cambio de fase y la intensidad, lo cual nos lleva a considerar un panorama prometedor para la grabación de la fase en un material, esto primordialmente debido a que trabajaremos en la generación de hologramas de fase, por lo tanto, podemos concluir que este cambio de fase influye en la eficiencia de las rejillas.

2.8. Absorción no lineal

Absorción lineal significa que la potencia óptica extraída del haz de luz a medida que atraviesa el medio absorbente es una función directa de la potencia en un punto dado.

Esto se describe matemáticamente mediante una ecuación diferente lineal elemental. La cual se conoce como ecuación de Beer's. Ver Ecuación 2.16.

$$\frac{d}{dz}I(z) = -\alpha I(z) \quad (2.16)$$

$$\frac{I(L)}{I(0)} = \exp(-\alpha L) \quad (2.17)$$

La Ecuación 2.17. significa que la irradiancia decrece exponencialmente en función de la distancia de propagación en un medio de absorción lineal.

En el régimen no lineal, nosotros no esperamos un modelo de ley de Beer's aún. Por definición, la absorción será una función no lineal de la irradiancia en un punto dado. Para describir la absorción no lineal de una luz monocromática. Ver Ecuación 2.18.

$$\frac{d}{dz}I = -\alpha I - \beta I^2 - \gamma I^3 \dots \quad (2.18)$$

El coeficiente β corresponde al proceso de absorción de dos fotones y γ es el coeficiente de absorción de 3 fotones.

Existen procesos de 4 fotones e incluso de orden superior, aunque rara vez se encuentran, pero ciertamente posibles. Para hacer estas distinciones, la Ecuación 2.18, se escribe en ocasiones con coeficientes k_i o α_i en lugar del alfabeto griego secuencial. Ver Ecuación 2.19.

$$\frac{d}{dz}I = -k_1 I - k_2 I^2 - k_3 I^3 - k_4 I^4 \dots \quad (2.19)$$

Las unidades de los distintos coeficientes de absorción deben mantener la coherencia dimensional de las ecuaciones 2.18 y 2.19, que son irradiancia/longitud o potencia/(longitud)³. Estos se muestran en la tabla 2.1. Si hay absorción lineal, los procesos no lineales en esa longitud de onda son a menudo (pero no siempre) despreciablemente débiles. Esto significa que tenemos las siguientes desigualdades:

$$k_1^i >> k_i I^i \rightarrow \text{donde} \rightarrow i \geq 2 \quad (2.20)$$

La absorción no lineal se observa generalmente en el régimen de longitud de onda en el que el medio es transparente a la luz de baja irradiancia, es decir, donde la absorción lineal es despreciable. Cabe destacar que existen situaciones en las que la absorción lineal es grande y se convierte en un componente crucial del efecto no lineal agregado. Por el momento, no tenemos en cuenta la absorción lineal. Si la energía de los fotones incidentes y los niveles de energía del sistema lo permiten, el proceso no lineal de orden inferior es la absorción de dos fotones, descrita por la Ecuación 2.21.

$$\frac{d}{dz} I = -k_2 I^2 \quad (2.21)$$

Tabla 2.1. Dimensiones de los coeficientes de absorción óptica.

Procesos	Coeficiente	Unidades
Absorción lineal	α, k_1	longitud ⁻¹
Absorción de dos fotones	β, k_2	longitud/potencia
Absorción de tres fotones	γ, k_3	longitud ³ /potencia ²
Absorción de cuatro fotones	k_4	longitud ⁵ /potencia ³

La absorción lineal y no lineal son dos fenómenos físicos presentes en nuestra investigación experimental. Esto es posible motivado a que la absorción promueve electrones de estados de baja a alta energía en el medio. El cambio en la densidad de electrones excitados asociado a la luz (tanto lineal como no lineal) se denomina generación de foto-carreras. Estos foto-transportadores (foto-electrones) pueden modificar la absorción lineal así como las propiedades de refracción del material, parámetros que son relevantes en el estudio de materiales orgánicos. En resumen, la principal diferencia es que los foto-carreras se relacionan con la generación de pares de carga para la absorción de la luz, a diferencia de los foto-transportadores, que son estas cargas desplazándose al mismo tiempo que contribuyen a la corriente eléctrica del material.

2.9. Auto-modulación de fase

Como resultado del efecto óptico Kerr, una onda óptica que viaja en un medio no lineal de tercer orden experimenta una auto-modulación de fase (SPM). El desplazamiento de fase

en el que incurre un haz óptico de potencia P y área de sección transversal A, que recorre una distancia L en el medio, es:

$$\varphi = -n(I)K_0L = 2\pi n(I)L/\lambda_0 = -2\pi(n + n_2P/A)L/\lambda_0 \quad (2.22)$$

para que finalmente sea:

$$\Delta\varphi = -2\pi n_2 \frac{L}{\lambda_0 A} P \quad (2.23)$$

Donde $\Delta\varphi$ es proporcional a la potencia óptica P, la auto modulación de fase es útil en aplicaciones donde la luz controla a la luz, por ejemplo: la creación intrínseca de lentes de enfo-camiento o desenfo-camiento, aunado al estudio de la no linealidad en materiales. [Saleh and Teich, 2019].

Derivado de la auto-modulación de fase, los anillos de auto-difracción son generados. Estos anillos se rigen por el modelo matemático basado a campo lejano. Para una descripción más exhaustiva, tenemos el estudio realizado por [Ramirez et al., 2010]. Los anillos que se producen están relacionados con el cambio de fase $\Delta\varphi = \Delta\phi \sim N$ siendo N en este caso el número de anillos.

Para generar el fenómeno de la auto-modulación de fase, existen dos mecanismos principales: transición electrónica mediante láseres pulsados o térmica mediante un láser continuo, como fue el caso en nuestra investigación. La auto-modulación de fase es inducida cuando los mecanismos no lineales involucran procesos de transporte como la conducción de calor en materiales con no linealidades, la conducción de calor es esencial en este fenómeno, ya que se deriva por la utilización de un láser continuo y no electrónico, aunado a un material que presenta una fuerte absorción.

Y el índice refractivo no lineal podrá ser calculado como:

$$n_2 = \frac{\lambda w_0^2 \Delta\phi_0}{2P(1 - e^{\alpha L})/\alpha} \quad (2.24)$$

donde $\Delta\phi_0$ es el cambio de fase máximo, P es la potencia, α es el coeficiente lineal de absorción y L, el grosor de la muestra.

2.10. Eficiencia de difracción

La eficiencia de difracción (η) es un parámetro muy importante que sirve para determinar la calidad de una rejilla y se define como la irradiancia de luz monocromática difractada (I_t) entre la irradiancia incidente (I_0), multiplicado por 100 [George, 2017].

$$\eta = \frac{I_t}{I_0} \times 100 [\%] \quad (2.25)$$

2.11. Modelo físico de los órdenes de difracción

Basados en los fundamentos del trabajo [George, 2017]. Para describir por qué se forman los órdenes de difracción al pasar la luz a través de una rejilla de difracción formada por la interferencia de dos haces de luz, es necesario un análisis riguroso basado en la transformada de Fourier. Sin embargo, está fuera de los propósitos de esta tesis un análisis riguroso, solo presentamos una descripción física del fenómeno. Como se ha descrito con anterioridad, primero se hacen interferir dos ondas planas, lo cual da como resultado un patrón de interferencia, o líneas de interferencia. Cuando otra longitud de onda incide en dicho patrón, sufre modificaciones en su fase. Es decir, los órdenes difractados por dicha red están separados por su frecuencia espacial: a mayor frecuencia, mayor separación de los haces.

La manera en la que se forman los órdenes de difracción se puede explicar de la siguiente manera: cuando incide un haz de luz sobre una rejilla, esta se desviará en direcciones discretas, produciendo puntos luminosos ubicados en posiciones simétricas. Estos puntos son simétricos respecto al orden cero ubicado en la misma posición que el haz incidente, de tal forma que al medir la intensidad de cualquiera de los dos órdenes (+1 o -1) multiplicado por 100 y dividirla entre la intensidad del haz incidente, se obtiene la eficiencia de difracción a dicho orden. En general, si la rejilla difracta en más órdenes, la eficiencia total será la suma de las intensidades de los órdenes difractados multiplicados por 100 entre la intensidad del haz incidente

2.12. Holografía

La holografía es un campo mucho más amplio de lo que la mayoría de la gente ha percibido, por lo tanto, se encuentra subestimada. La grabación y visualización tridimensionales

son sólo una pequeña parte. Los elementos ópticos holográficos conocidos como (HOE) pueden desempeñar las funciones de espejos, lentes, rejillas o combinaciones de ellas, y se utilizan en infinidad de dispositivos técnicos. Un ejemplo es la interferometría holográfica, que puede medir desplazamientos microscópicos en la superficie de un objeto y pequeños cambios en el índice de refracción de objetos transparentes, como el plasma y las ondas de calor. Los futuros dispositivos fotónicos, como los chips electroópticos que incorporarán sin duda microláseres y HOE para cálculos ópticos, interconexiones, sistemas de memoria analógica y digital masivos [Saleh and Teich, 2019].

Para [Svelto, 1982] en el método holográfico original inventado por Dennis Gabor en 1947, se utilizaban como objetos dispositivos simples con letras opacas y una lámpara de vapor de mercurio como fuentes de luz. La figura 2.13 muestra el procedimiento utilizado. La mayor parte de la luz pasa a través del portaobjetos y sirve como haz de referencia. Sin embargo, cerca de las líneas oscuras que forman las letras, parte de la luz transmitida es difractada o difundida por cada elemento de resolución (el elemento más pequeño que se puede resolver) en la diapositiva la interferencia de los frentes de onda producidos por cada elemento de resolución con el frente de onda no perturbado del haz de referencia, crea un patrón de círculo concéntrico en la placa que se asemeja a una placa de difracción de zona de Fresnel. El holograma resultante es la superposición de muchas de estas figuras, una para cada elemento de resolución del objeto. La figura 2.14 muestra una reconstrucción del holograma desarrollado. La difracción de una parte del haz de referencia es transmitido por un patrón de interferencia de círculos concéntricos que recrea una imagen virtual en los dibujos del objeto. Los nombres de los científicos que aparecen en los dibujos estaban presentes en el holograma original de Gabor publicado en las actas de la Royal Society en 1949.

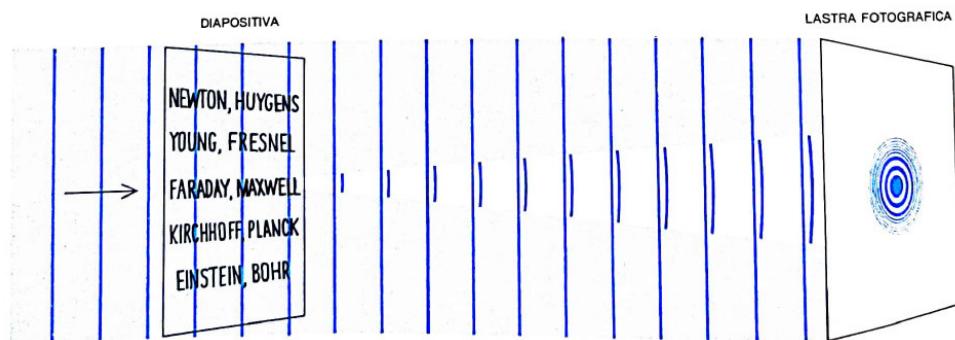


Figura 2.13. Procedimiento original utilizado por el físico Gabor.

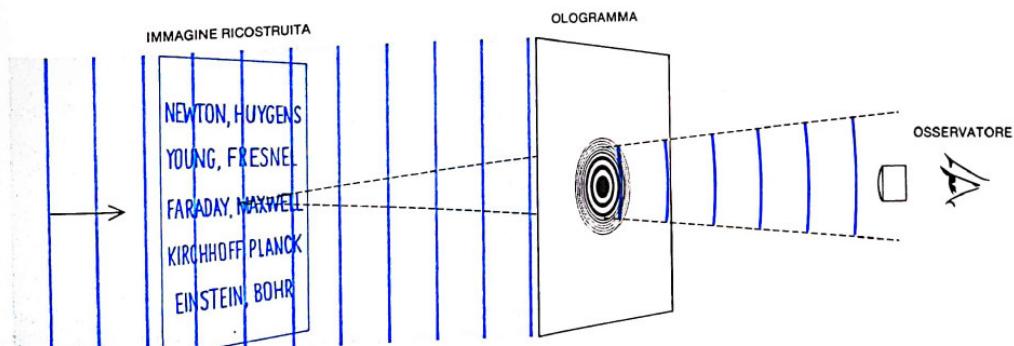


Figura 2.14. Reconstrucción del holograma desarrollado por el físico Gabor.

Un holograma es una grabación en un medio bidimensional o tridimensional del patrón de interferencia formado cuando una fuente puntual de luz (el haz de referencia) de longitud de onda fija se encuentra con luz de la misma longitud de onda fija procedente de un objeto (el haz del objeto). Cuando el holograma está iluminado únicamente por el haz de referencia, el patrón de difracción recrea los frentes de onda de la luz del objeto original. Así, el espectador ve una imagen indistinguible del objeto original. Hay muchos tipos de hologramas y diversas formas de clasificarlos. Para nuestro propósito podemos dividirlos en 4 tipos: hologramas de reflexión u hologramas de transmisión, aunado a hologramas de fase u hologramas de amplitud [Saleh and Teich, 2019].

Emmett Leith (1927-2005), uno de los pioneros de la holografía, en 1986 señaló:

La holografía puede parecer un campo de investigación no muy amplio. Cuando se combina con otras áreas, se obtienen nuevos campos de investigación que ofrecen una gran riqueza física.

2.13. Materiales orgánicos

Los autores [Bredas et al., 1994] discuten que los materiales orgánicos son de gran interés, debido a su relativo bajo costo, facilidad de fabricación e integración en dispositivos, adaptabilidad que permite ajustar con precisión la estructura química y las propiedades para un proceso óptico no lineal determinado, altos umbrales de daño láser y tiempos de respuesta óptica no lineales rápidos.

Como se discute en [Caicedo, 2017] la moringa oleifera (MO), es una especie perteneciente a la familia moringácea. La familia moringácea está conformada entre 12 y 14 especies que pertenecen a un solo género llamado moringa, de las cuales se reconocen 13 especies que abarcan una gama muy diversa de hábitos o formas de crecimiento, desde hierbas y arbustos hasta árboles grandes. Todas ellas nativas del norte de la India [Olson and Fahey, 2011]. La moringa se caracteriza por presentar un rápido crecimiento al mismo tiempo que no es exigente a especificaciones de clima y calidad del suelo. Estos aspectos le permiten ser la especie más común que se cultiva en el mundo. La FAO (conocida como la organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura) menciona su valoración como fuente alimentaria. Ver tabla 2.2, ya que es resistente a condiciones climatológicas adversas, esto le permite producir hojas durante la estación seca y en tiempos de sequía, cuando otras fuentes alimentarias no son disponibles según la FAO.

Tabla 2.2. Valores medios obtenidos en hojas de Moringa oleifera.

Nutrientes (g)	Valores representativos por 100g de materia seca
Proteína	29 ± 6
Minerales	11 ± 2.2
Grasa	8 ± 2.5
Carbohidratos	38 ± 7
Fibra	10 ± 3
Calcio (mg)	1924 ± 288
Cobre (mg)	1.0 ± 0.2
Hierro (mg)	28 ± 6
Potasio (mg)	13384 ± 420
Magnesio (mg)	422 ± 52
Fósforo (mg)	267 ± 49
Zinc (mg)	2.5 ± 0.6
Vitamina A (IU)	15620 ± 6475
Vitamina C (IU)	773 ± 91

En México para el año 2014, fue decretado y promovido su cultivo por la secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (SAGARPA), mediante el instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias (INIFAP), debido a sus propiedades que la ha sido atribuidas por su composición, esta última acción impulso el desarrollo de investigaciones multipropósito en las regiones de Sonora, Yucatán, Jalisco y Chiapas, con el objetivo de conocer su comportamiento agronómico, medicinal, nutricional y energético para el consumo humano, animal o como una nueva especie productora de aceite para biodiésel, aunado a que se investiga su variabilidad genética para optimizar su explotación (SAGAPRA,2014).

Las hojas de la moringa son la parte más usada por el contenido y variedad

de fitoquímicos, como los compuestos polifenólicos, principalmente ácidos fenólicos y flavonoides, se reconocen algunas actividades biológicas como antioxidante, anticancerígena e hipoglucemiante, antiinflamatoria y aumento del potencial inmune. En [Moon et al., 2006] Los flavonoides son compuestos de bajo peso molecular que comparten un esqueleto común de difenil-piranos(C6-C3-C6), compuesto por dos anillos de fenilos (A y B) ligados a través de un anillo C de pirano (heterocíclico), los átomos de carbono en los anillos C y A se numeran del 2 al 8, y los anillos B desde el 2 al 6. Los flavonoides se dividen en varios tipos, ver figura 2.15. La mayor concentración de flavonoides se encuentra en las hojas secas de moringa, por ejemplo, la miricetina, queracetina y kaempferol son los principales flavonoides que se encuentran en las hojas de moringa oleifera. Ver figura 2.16.

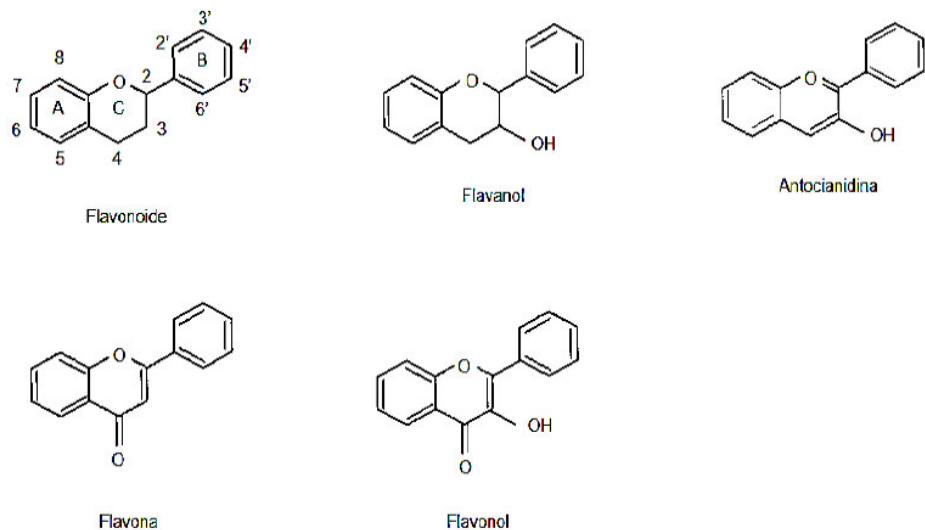


Figura 2.15. Flavonoides. Estructura básica y tipos.[Caicedo, 2017].

Estructura básica de flavonoides

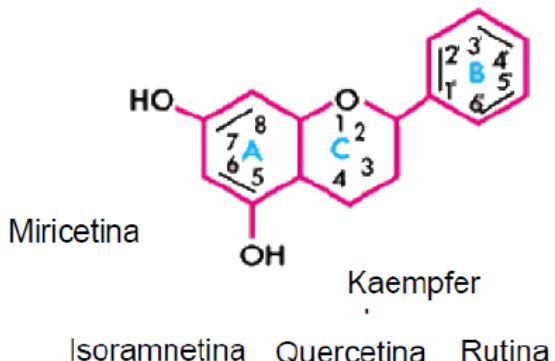


Figura 2.16. Estructura de flavonoides destacados en hojas en hojas de moringa oleifera.[\[Caicedo, 2017\]](#).

El interés de nuestra investigación con el material orgánico, en este caso la moringa, se fundamenta en la búsqueda de materiales con propiedades ópticas no lineales, lo comentado anteriormente sugiere que los compuestos denominados flavonoides y fenólicos pueden ser la causa de la presencia de no linealidad, una razón o base para sostener esta idea parte del trabajo realizado por [\[Caicedo, 2017\]](#) donde explican que los flavonoides se sintetizan en las plantas y participan en la fase dependiente de la luz, durante el cual son catalizadores en el transporte de electrones, lo cual le atribuye a los flavonoides y fenólicos sus características principales como un accionador antioxidante y eliminador de radicales libres, Sugerimos que esta puede ser parte de lo que conduce a una gran generación del tercer armónico y absorción de dos fotones, aunado al interesante fenómeno físico del efecto Kerr, donde el índice de refracción no lineal es dependiente de la intensidad.

En esta tesis se realizaron estudios en moringa usando sus propiedades ópticas no lineales para grabar una rejilla de difracción. El propósito es incrementar el índice de refracción controlando la intensidad, de acuerdo al modelo Kerr. En el siguiente capítulo describiremos los arreglos experimentales usados.

CAPÍTULO 3

Metodología

En el presente capítulo presentamos un estudio experimental de las propiedades ópticas no lineales de los materiales utilizados para la fabricación de las rejillas.

3.1. Preparación de material fotosensible

Para el estudio de la influencia de las propiedades no lineales en las rejillas se utiliza un material no lineal y se realizan diferentes concentraciones, aumentando la cantidad de material no lineal. El material orgánico utilizado fue la moringa oleifera - MO.

3.2. Montajes utilizados

Un método ampliamente utilizado por su sencillez para el estudio de la no linealidad es la técnica de Z-Scan, la cual se ha empleado para caracterizar cristales líquidos, materiales híbridos, materiales orgánicos, metales como las nanopartículas de oro y plata y colorantes líquidos como la Hibiscus sabdariffa (Jamaica) estudiada en [Cano-Lara et al., 2017] . Entre los fenómenos de tercer orden también se encuentra la auto-modulación de fase, la cual puede ser estudiada mediante los anillos de auto-difracción en un material no lineal, montaje que fue estudiado en los materiales a caracterizar.

3.2.1. Técnica z-scan

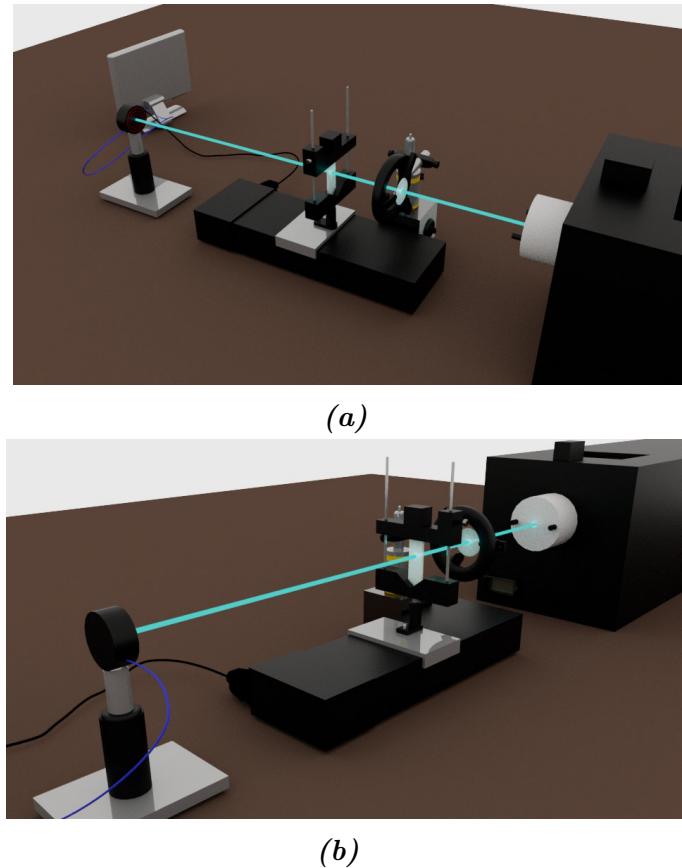


Figura 3.1. Montaje experimental de la técnica Z-scan a)Vista superior b)Vista lateral

La técnica Z-scan es el método cuantitativo de medir el índice de refracción no lineal discutido por [Sundari and Palanisamy, 2006] Los experimentos Z-scan se realizaron utilizando

un láser continuo de Argón con longitud de onda de 477 nm (Coherente Innova 70), una lente de 7.5 cm de distancia focal y un fotodetector. El montaje experimental se muestra en la Figura 3.1.

[Sheik-Bahae et al., 1989] Establece que el índice de refracción no lineal n_2 puede medirse mediante la técnica Z-scan, que puede medir simultáneamente la absorción no lineal y la refracción no lineal en sólidos y soluciones líquidas. Se trata de una técnica de haz único que nos proporciona tanto el signo como la magnitud de las no linealidades del índice de refracción. Este método es rápido, sencillo de realizar y preciso, por lo que se utiliza con frecuencia. Es especialmente adecuado para determinar el coeficiente no lineal n_2 para una longitud de onda determinada.

Un fotodetector es empleado para medir los cambios de la intensidad del haz de luz láser a campo lejano y con una apertura cerrada. La técnica consiste en desplazar la muestra a lo largo del eje óptico (dirección Z) de un haz láser focalizado, generalmente con distribución Gaussiana. Ahora bien, para medir el índice de refracción no lineal debemos cumplir con ciertas condiciones, ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Condiciones para medir el índice de refracción.

a) La muestra debe ser delgada, entre 1 o 2 milímetros de espesor, para cumplir con la condición de Rayleigh $L \ll Z_0$

b) Un láser

c) Lente, muestra, y detectores bien alineados

d) Se debe colocar un capuchón en el fotodetector para medir la máxima intensidad de la Gaussiana

Una vez establecido lo anterior, debemos saber que para caracterizar la muestra utilizaremos dos parámetros: ver Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros para caracterizar la muestra.

a) Refracción no lineal (n_2)

b) Adsorción no lineal (B)

Usamos el modelo Kerr y el modelo de formación de lente térmica. El modelo de Bahae solo aplica para $\Delta_\phi < \pi$, por lo tanto, para muestras con mayor cantidad de anillos o $\Delta_\phi > \pi$ debemos utilizar el modelo de lente térmica que se estudiará más adelante. Ver Tabla 3.3.

Es necesario aunar en este capítulo que la mayoría de los modelos solo proponen la medida de los efectos refractivos no lineales, sin embargo, no es posible separar

Tabla 3.3. Conceptos importantes.

Modelos Existentes	Cambio de fase permitido
<i>Modelo teórico de ajuste de Bahae</i>	$\Delta\Phi < \pi$
<i>Modelo de lente térmica</i>	$\Delta\Phi > \pi$

experimentalmente la absorción no lineal y los efectos refractivos no lineales, por esta razón en el trabajo [Severiano-Carrillo et al., 2017] se introduce una modificación, que incluye la absorción no lineal. En la expresión del modelo de la distancia focal planteado en [Severiano Carrillo et al., 2013]. Esta modificación permitió tener una mejor visión de los fenómenos físicos no lineales presentes en un material, es decir, que se podrá determinar la absorción no lineal y la refracción no lineal con una sola medida de campo lejano.

El modelo de lente térmica se fundamentó considerando el medio grueso como un conjunto de lentes delgadas separadas por una distancia d , inmersas en el medio no lineal de índice de refracción n_2 . La distancia focal $f(z)$ para cada una de estas lentes se ve afectada debido a las propiedades del haz Gaussiano dentro del material. La transmitancia normalizada de las curvas Z-scan puede ser calculada numéricamente conociendo la cintura del haz Gaussiano y utilizando matrices ABCD para cada unidad [Severiano Carrillo et al., 2013]. En este modelo, el medio delgado se considera inferior a $1,5Z_0$; por el contrario, si el medio tiene un espesor diferente, se considera un medio grueso.

A continuación se muestra la Ecuación 3.1 , que define la distancia focal, teniendo en cuenta la absorción no lineal.

$$f(z) = a \frac{\pi w^4(z)}{[\alpha d \pi w^2(z) + 2\beta d P]} \quad (3.1)$$

donde:

$$a = \frac{\kappa \pi}{P(\frac{d_n}{dT})} \quad (3.2)$$

para calcular n_2 utilizamos la Ecuación 3.3 [Henari et al., 2013].

$$n_2 = \frac{\lambda w_0^2 \Delta\phi}{2PL_{eff}} \quad (3.3)$$

donde L_{eff} es el espesor efectivo de la muestra, $\Delta\phi$ representa el desplazamiento de fase no lineal en el foco y se calcula acorde a [Lara et al., 2007].

$$\Delta\phi = \frac{z_0}{2f(z)} \quad (3.4)$$

Finalmente, podemos concluir que el uso del modelo de lente térmica nos permitirá tener una mejor comprensión de los fenómenos ópticos no lineales presentes en un material. Al mismo tiempo que es viable para encontrar un mejor ajuste entre las curvas experimentales y teóricas de Z-scan a campo lejano. Así, es posible obtener información sobre la absorción no lineal y la refracción no lineal con una sola medida.

En esta sección logramos ver que Z-Scan puede resumirse como una técnica experimental simple para medir susceptibilidades no lineales dependientes de la intensidad de tercer orden en materiales ópticos no lineales. En la siguiente sección se definirá una propiedad no lineal también relacionada con el índice de refracción no lineal, el cual es la auto-modulación de fase (SPM – *Self Phase Modulation*), que se manifiesta como la formación de anillos de auto-difracción.

3.2.2. Anillos de auto difracción

La evaluación de la propiedad óptica de no linealidad se realizó al igual que en los experimentos de Z-scan mediante el mismo láser de Argón, una lente con distancia focal de 7.5 cm, una celda de cuarzo de un 1 mm donde se depositan las muestras con diferentes concentraciones, ver Figura 3.2. La muestra se ubica en el foco de la lente para que sea posible obtener los anillos definidos en una pantalla posterior.

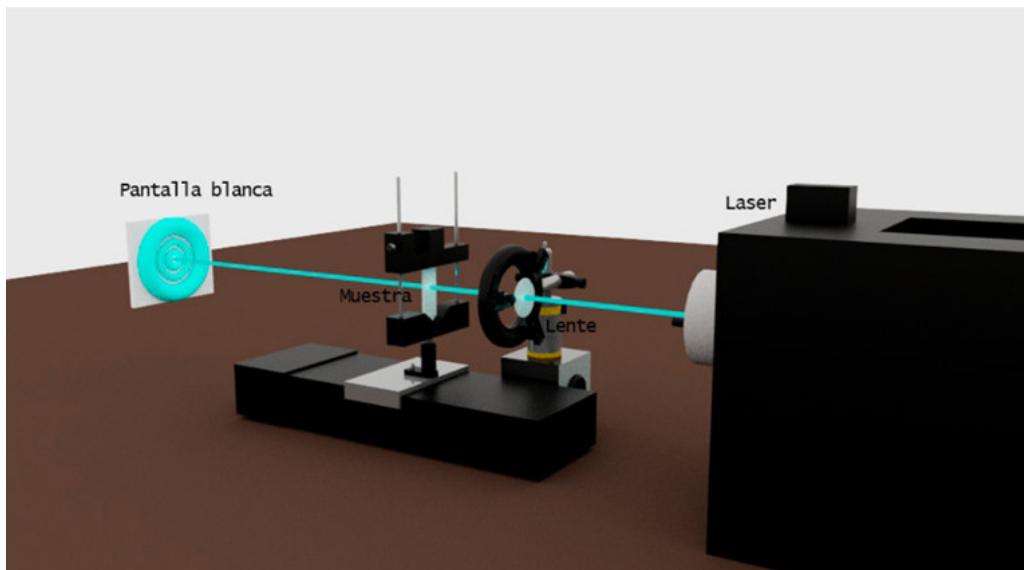


Figura 3.2. Esquema experimental para la obtención de los anillos de auto-difracción.

En esta sección es primordial preguntarse: ¿qué sucede cuando aparecen anillos? En la

parte espacial, este fenómeno aparece cuando el autoenfocamiento es lo suficientemente fuerte y se manifiesta en una distorsión del frente de onda, lo cual provoca un patrón de difracción a campo lejano conformado por anillos concéntricos. El fenómeno de auto-modulación de fase es similar al caso temporal. Para un perfil transversal de iluminación de tipo Gaussiano, el perfil de cambio de fase es también gaussiano centrado en $r=0$. el número de anillos está relacionado con el cambio de fase máximo dado por:

$$\frac{\Delta\phi(\gamma)_{Max}}{2\pi} \quad (3.5)$$

Ésta Ecuación es válida para medios no locales; se ha demostrado que el número de anillos varía de acuerdo a la no localidad del medio. Las mediciones que realizamos en el laboratorio y debido a la potencia del láser suelen o son no locales, es decir, que se logra calentar el medio externo también.

Para generar el fenómeno de la auto-modulación de fase, debemos conocer que existen dos mecanismos en la formación del efecto físico que ayuda a calcular el índice de refracción no lineal.

Tabla 3.4. Mecanismos principales para generar la auto-modulación de fase.

Mecanismo	Observación	Tiempo del pulso (t)
Electrónica pura (Pulsos)	$t < \tau_0$ — El pulso es más corto que el tiempo de interacción electrónica	$t < 100$ ps
Térmico (Continuo)	$t > \tau_0$ — El pulso es más largo que la interacción electrónica	$t \approx 100$ ps

Una vez comprendidas y analizadas las propiedades de no linealidad, en esta sección se estudia la formación de una rejilla.

3.2.3. Creación de una rejilla

La rejilla de difracción fue fabricada usando un interferómetro del tipo de división de amplitud, que es semejante a la forma geométrica del interferómetro de Young, donde la diferencia de fase entre los haces que interfieren se debe a la diferencia de camino óptico. En la Figura 3.3 se muestra el esquema de este interferómetro utilizado para grabar la interferencia de luz en las muestras utilizadas.

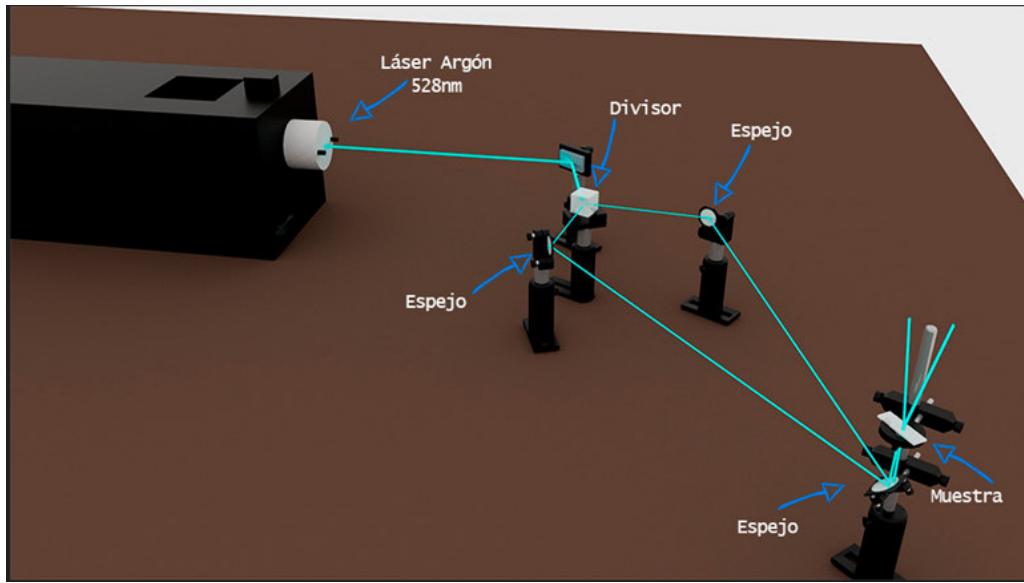


Figura 3.3. Esquemático para la grabación de la interferencia en las muestras.

El arreglo empleado de división de amplitud hace que la diferencia de fase de los haces que producen la interferencia se deba a los diferentes caminos ópticos. El haz proveniente del láser es dividido por un divisor de haz y los haces que emergen de este, son desviados por los espejos mostrados en la figura 3.3. Estos haces se dirigen hacia la pantalla donde interfieren.

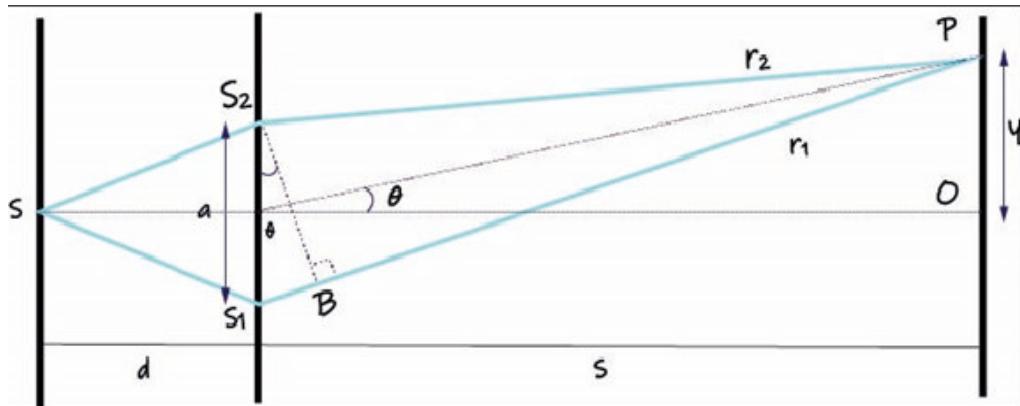


Figura 3.4. Geometría de interferencia.

En la Figura 3.10 es posible observar la diferencia de camino óptico entre los rayos $\overline{S_1P}$ y $\overline{S_2P}$ y es posible establecer que:

$$\overline{S_1B} = \overline{S_1P} - \overline{S_2P} = \overline{r_1} - \overline{r_2} = a \operatorname{Sen}\theta \quad (3.6)$$

pero utilizando una aproximación para ángulos lo suficientemente pequeños, $\operatorname{Sen}\theta \approx \theta$, y por

ángulos equivalentes, se tiene que:

$$\bar{r_1} - \bar{r_2} \approx a\theta \approx a \left(\frac{y}{s} \right) \quad (3.7)$$

como la interferencia constructiva se ve cuando la diferencia sea igual a $m\lambda$, el periodo y la posición angular estarán dados por:

$$\Lambda = \frac{s}{a}\lambda \quad (3.8)$$

$$\theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (3.9)$$

para el máximo de interferencia de orden m , siempre y cuando los haces sean coherentes y tengan la misma irradiancia I_0 , se obtendrá:

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\kappa(r_1 - r_2)}{2} \right) \quad (3.10)$$

ahora finalmente tenemos:

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi a y}{\lambda s} \right) \quad (3.11)$$

Generándose una interferencia senoidal para un medio lineal. Donde a será la distancia entre los espejos, s es la distancia de la muestra a los espejos, λ la longitud de onda del láser, $I(\theta) = 4I_0$ es la densidad de flujo. El factor 4 proviene del hecho de que la amplitud del campo eléctrico es el doble de lo que sería en ese punto con una rendija cubierta.

Sin embargo, para un medio no lineal, el patrón de interferencia debe ser no lineal. Ahora bien, para simular numéricamente los órdenes de difracción, usaremos el modelo de propagación de la luz a través de una rendija. En nuestro caso tenemos un patrón de interferencia, donde por las zonas claras pasa luz, por lo que es válido considerar su comportamiento como una rendija. Al tener muchas rendijas, se tiene tanto interferencia como difracción. Para propósitos de esta tesis experimental, solo mostramos los resultados obtenidos y una explicación física del fenómeno. En realidad, es algo más complejo porque la rejilla está siendo afectada por el índice de refracción no lineal del medio. Se deja para un estudio posterior teórico-numérico que aborde con detalle el análisis de este.

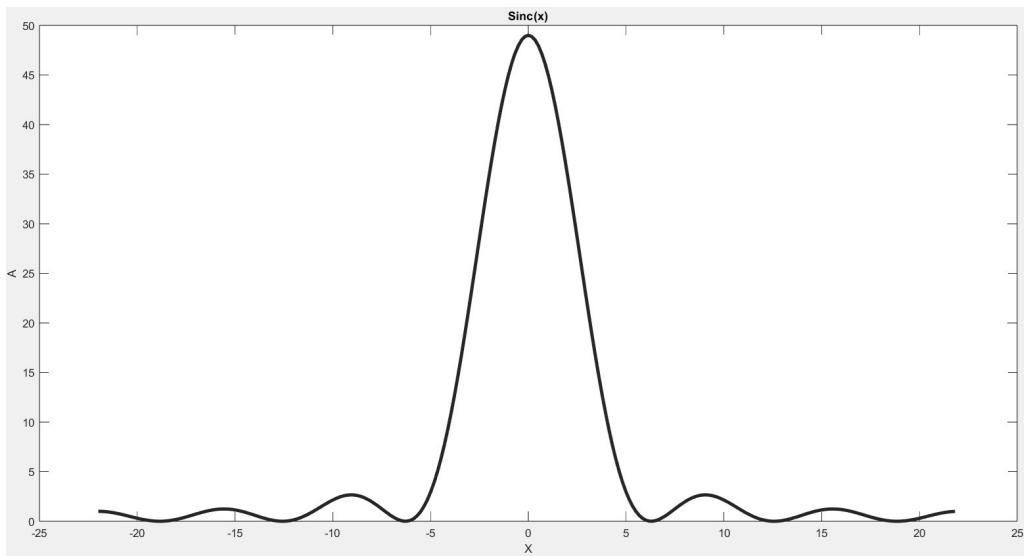


Figura 3.5. Interferencia en un medio no lineal.

Lo interesante es la contribución de la no linealidad a la eficiencia de la rejilla, la cual es una propiedad estudiada para describir dicha rejilla.

3.2.4. Medición de la eficiencia de la rejilla de difracción

Como nuestro objetivo es conocer el valor cuantitativo que aporta las propiedades ópticas no lineales del material orgánico a la eficiencia de la rejilla de difracción, debemos proceder con la medición de la eficiencia que se realiza mediante un montaje experimental donde se tiene el material fotosensible en el lugar donde se forma la interferencia. La rejilla se graba con un láser de Argón con longitud de onda de 528 nm, luego de grabada la rejilla se hace pasar un haz láser He-Ne de 633 nm de longitud de onda, midiendo a lo largo del tiempo la intensidad de luz de primer orden, teniendo la medida por defecto de la intensidad antes de entrar en contacto con el material, con estas intensidades se realiza el cálculo de la eficiencia de la rejilla. Los valores encontrados se encuentran descritos en el capítulo 4.

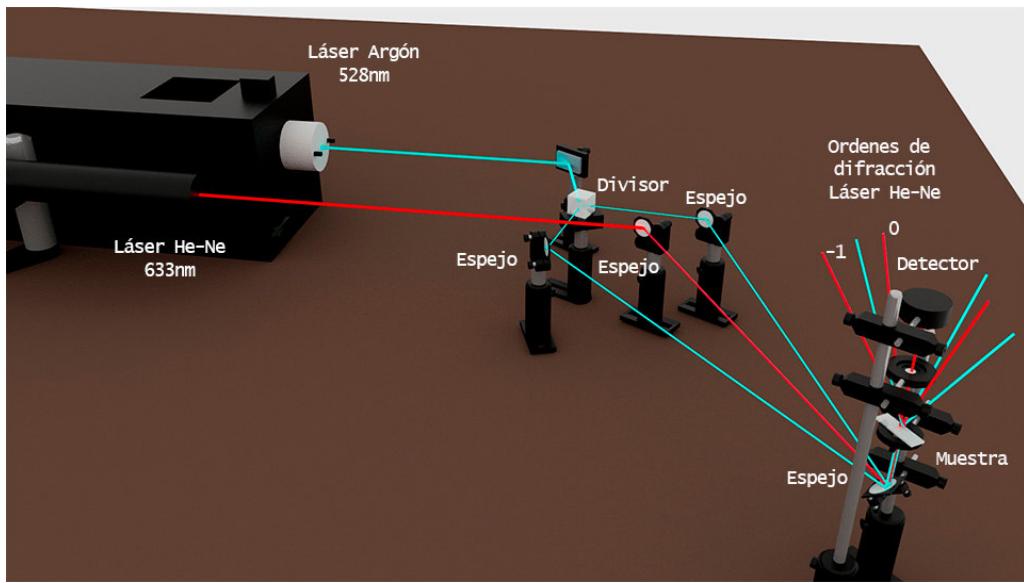


Figura 3.6. Montaje para medir eficiencia con el detector de intensidad.

Para la grabación del holograma se utiliza el montaje holográfico mostrado en la Figura 3.13,

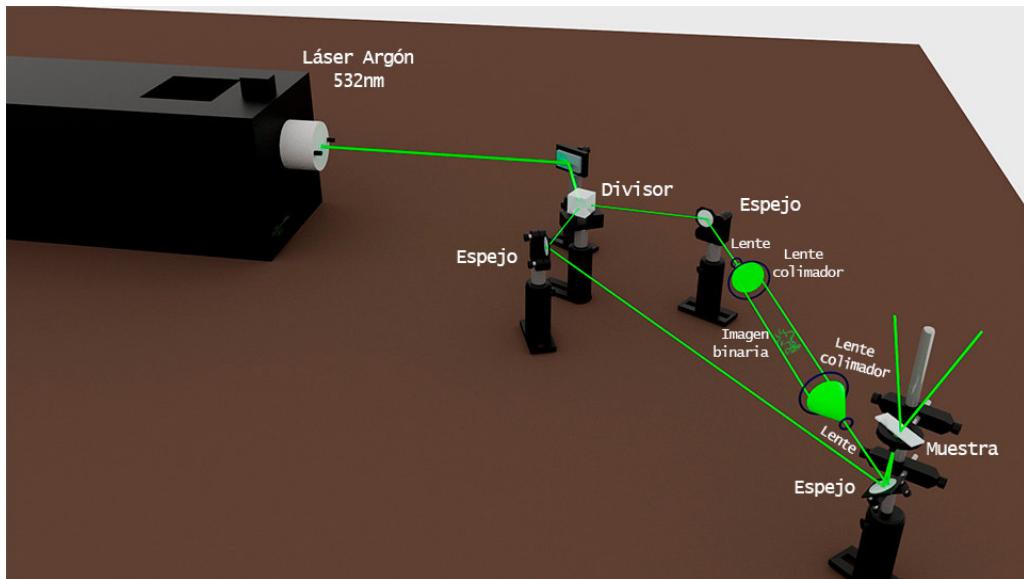


Figura 3.7. Montaje para grabación de un holograma.

3.2.5. Preparación de muestras fotosensibles

Se emplearon diferentes materiales para el grabado de la rejilla. Uno de esos materiales usados es la Gelatina Dicromatada. La cual consiste en la combinación de gelatina con Dicromato de Amonio o Dicromato de Potasio. Los resultados obtenidos en [de León et al., 2021]. Demuestran el buen rendimiento del dicromato de potasio como sensibilizador. Además, la grabación de hologramas en la gelatina dicromada allí propuesta podría ser una forma muy eficiente de fabricar elementos difractivos para prácticas en laboratorios universitarios, debido a que puede producirse masivamente en cualquier laboratorio con requisitos mínimos y a bajo coste.

3.2.6. Materiales orgánicos utilizados

El material orgánico a utilizar para aumentar la eficiencia en el desempeño de la rejilla de difracción, es la moringa oleifera (MO). Para la preparación de la muestra, como se mencionó en la sección anterior, se emplearon diferentes concentraciones elaboradas con la MO, 0.525g de gelita bloom y 14.25ml de agua destilada. Los pasos para preparar las muestras son los siguientes: a) Hidratar el agua (se agrega la gelita bloom en los 14.25ml de agua, dejando reposar por 10min a temperatura ambiente. b) La solución anterior se calienta entre 35° y 60°C durante 10min, también se debe colocar el agitador magnético. c) En este paso se agrega a la solución el dicromato de potasio, manteniéndose con el agitador magnético durante 45min. nota: mantener la temperatura no mayor a 45°C. El paso siguiente consistió en verter la solución del material fotosensible en una base compuesta por dos portaobjetos de microscopio, previamente limpiados con alcohol isopropílico para eliminar cualquier partícula de polvo y grasa, separados por películas de celofán y unidas por clips, como se muestra en la fig.3.14. Una vez listas las bases, se colocaron verticalmente. Luego Material fotosensible se vertió en la parte superior, de forma que el gel entró en las bases por gravedad. Una vez que el material fotosensible llenaba una base, esta se colocaba horizontalmente y se dejaba reposar durante dos horas protegido de la luz, hasta que el material fotosensible se gelificara. Se debe acotar que en todas las muestras preparadas se utilizaron concentraciones de MO previamente filtradas (con papel filtro, 2 veces antes de utilizarla) con el objetivo de obtener mayor homogeneidad en la muestra. Para la realización del material fotosensible, se probaron con diferentes concentraciones, las mismas se encuentran a continuación: Cumpliendo con la detallada explicación de los materiales a utilizar, preparación y sus respectivas concentraciones, damos paso a al siguiente capítulo 4, donde se expondrán los resultados al mismo tiempo que

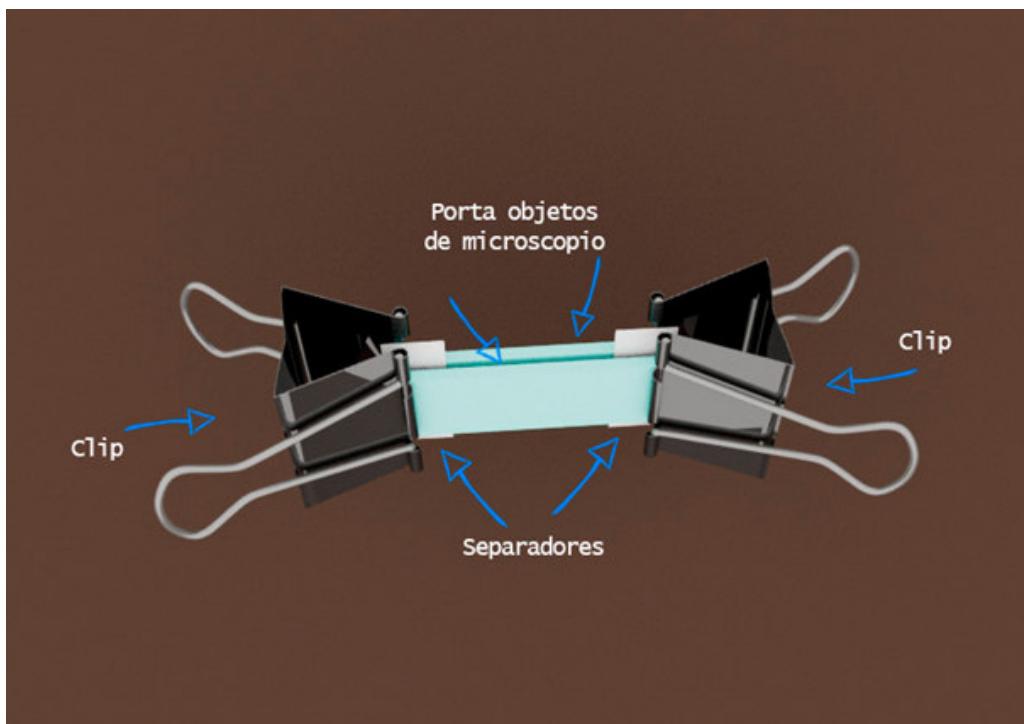


Figura 3.8. Representación esquemática de la base.

Tabla 3.5. Concentraciones para las muestras de material fotosensible de MO.

Muestra	MO (ml)	Agua destilada (ml)	Dicromato de Potasio (g)	Gelita bloom(g)
MO1	2	14.25	0.225	0.525
MO2	1.5	14.25	0.225	0.525
MO3	1	14.25	0.225	0.525
MO3	0.5	14.25	0.225	0.525
MO4	0.2	14.25	0.225	0.525

se discutirá acerca de lo observado.

3.2.7. Muestra base

Para el grabado de la rejilla preparamos como muestra base gelatina dicromatada, añadiendo el material orgánico moringa. Esto con el fin de aumentar la eficiencia de la rejilla al considerar propiedades ópticas no lineales. Se hicieron pruebas con diferentes concentraciones de moringa. Las cantidades donde observamos una mayor intensidad en los órdenes de difracción, así como el mayor tiempo en permanecer en el material, se muestra en la tabla

3.5,

Tabla 3.6. Composición de la muestra MMDPG.

Agua destilada (g)	Gelita bloom (g)	Moringa (ml)	Dicromato de potasio (g)
14,25	0,525	0,2	0,225

En los experimentos realizados el único valor que se vario de la Muestra MMDPG (Muestra moringa-dicromato de potasio-gelita bloom) presentada fue la concentración de moringa, variando entre valores como: 2ml, 1.5ml, 1ml, 0.5ml, siendo finalmente 0,2ml donde se obtuvo el mejor resultado, los demás componentes de la muestra permanecieron en su concentración original.

CAPÍTULO 4

Resultados

4.1. Índice de refracción no lineal

Como mencionamos en el capítulo anterior, la no linealidad óptica de los materiales utilizados fue medida usando la técnica de Z-Scan [Sheik-Bahae et al., 1989]. La técnica fue aplicada para los materiales orgánicos; algunos de los resultados para cada material se muestran en la Figura 4.1.

Los materiales utilizados en las pruebas de Z-Scan, fueron disueltos en 50 ml de alcohol (Etílico) al 99.5 %. En la Figura 4.1 observamos que la pendiente es negativa, para todos los casos, y es una característica intrínseca de los materiales orgánicos. También se aprecia que la transmitancia pico-valle aparece a muy bajas potencias, entre 1mW a 2mW de potencia. Estos valores de potencia coinciden con la baja potencia, donde se obtuvo la destacable eficiencia presentada al momento de realizar las rejillas de difracción. En trabajos anteriores, [George, 2017] se demostró que la gelita bloom no presenta el fenómeno de no linealidad, por lo que es lineal. El dicromato de potasio sí presenta no linealidad, un estudio más amplio ha sido reportado en [George, 2017].

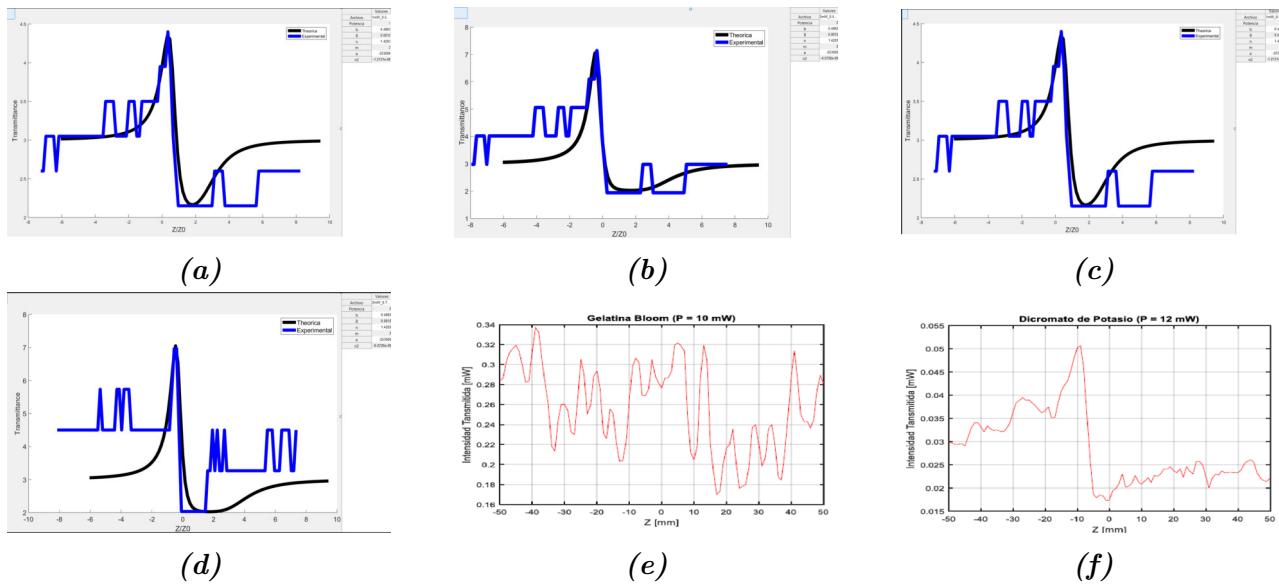


Figura 4.1. Datos graficados de las pruebas de Z-Scan para el material con sus respectivos valores de concentración en alcohol y potencia (a) 0.5ml-1mW(b)0.5ml-2mW(c)0.75ml-1mW(d)0.75ml-2mW(e)Gelita Bloom [George, 2017].(f)Dicromato de potasio [George, 2017].

La moringa oleifera presenta no linealidad a partir de potencias bajas como 1mW y 2mW.

Tabla 4.1. Cantidad de material utilizado para las pruebas de Z-Scan

	Moringa Oleifera [gramos]
Cantidad	2.2
	Disueltos en 50ml de alcohol Isopropílico al 96 %

Mediante la Ecuación 3.3, se calcula el índice de refracción no lineal (n_2), el mismo se indica en la tabla 4.2, para el caso de la moringa oleifera.

Se midió el índice de refracción no lineal (n_2) y la Absorción no lineal(B) de la moringa para dos concentraciones distintas, una concentración de 0.5ml y otra de 0.75ml; los resultados numéricos tanto del índice de refracción no lineal como absorción no lineal fueron idénticos en ambas concentraciones obteniendo valores de $n_2=-6.072610-09\text{cm}^2/\text{W}$ y $B=0.0012$. En [George, 2017] discutieron que estos valores tienen influencia al momento de grabar la rejilla. Sin embargo, se debe tener en consideración la interacción en cada una de las longitudes de onda utilizadas tanto en la transmisión como la absorción. Otros aspectos a tener en cuenta son: la temperatura, la potencia, el tamaño de la muestra, entre otros. Como la eficiencia

depende del índice de refracción no lineal, la manifestación más común del índice de refracción no lineal surge de la presencia de propiedades como la susceptibilidad no lineal de tercer orden presente en un material, lo que contribuye a aumentar el índice de refracción de la muestra, siendo un compuesto con mayor posibilidad de obtener mejores resultados de eficiencia. En la tabla 4.2. Se logra constatar cómo, teniendo igual concentración, pero aplicando una potencia mayor, el índice de refracción cambia, en coherencia con la ecuación 2.11. Del Capítulo 2.

Tabla 4.2. Cálculo del índice de refracción y absorción no lineal.

Muestra	Potencia del láser (mW)	Índice de refracción no lineal (n_2)	Absorción no lineal (B)
<i>Moringa diluida 0.5ml de alcohol</i>	1	-1.2131×10^{-8}	0.0012
<i>Moringa diluida 0.5ml de alcohol</i>	2	-6.0726×10^{-9}	0.0012
<i>Moringa diluida 0.75ml de alcohol</i>	1	-1.2131×10^{-8}	0.0012
<i>Moringa diluida 0.75ml de alcohol</i>	2	-6.0726×10^{-9}	0.0012

4.2. Anillos de auto difracción

La muestra de material orgánico, al ser colocada en el punto focal como se muestra en la figura 3.2. se obtienen los anillos mostrados en la figura 4.2 a diferentes potencias del láser. Para este experimento se utilizó un láser de Argón con longitud de onda de 477nm.

Podemos ver la presencia de anillos de auto difracción, motivado a que el auto-enfocamiento generado por ser un material orgánico con índice de refracción no lineal negativo, en este caso es muy intenso, manifestándose en una distorsión del frente de onda lo cual provoca un patrón de difracción a campo lejano conformado por anillos concéntricos.

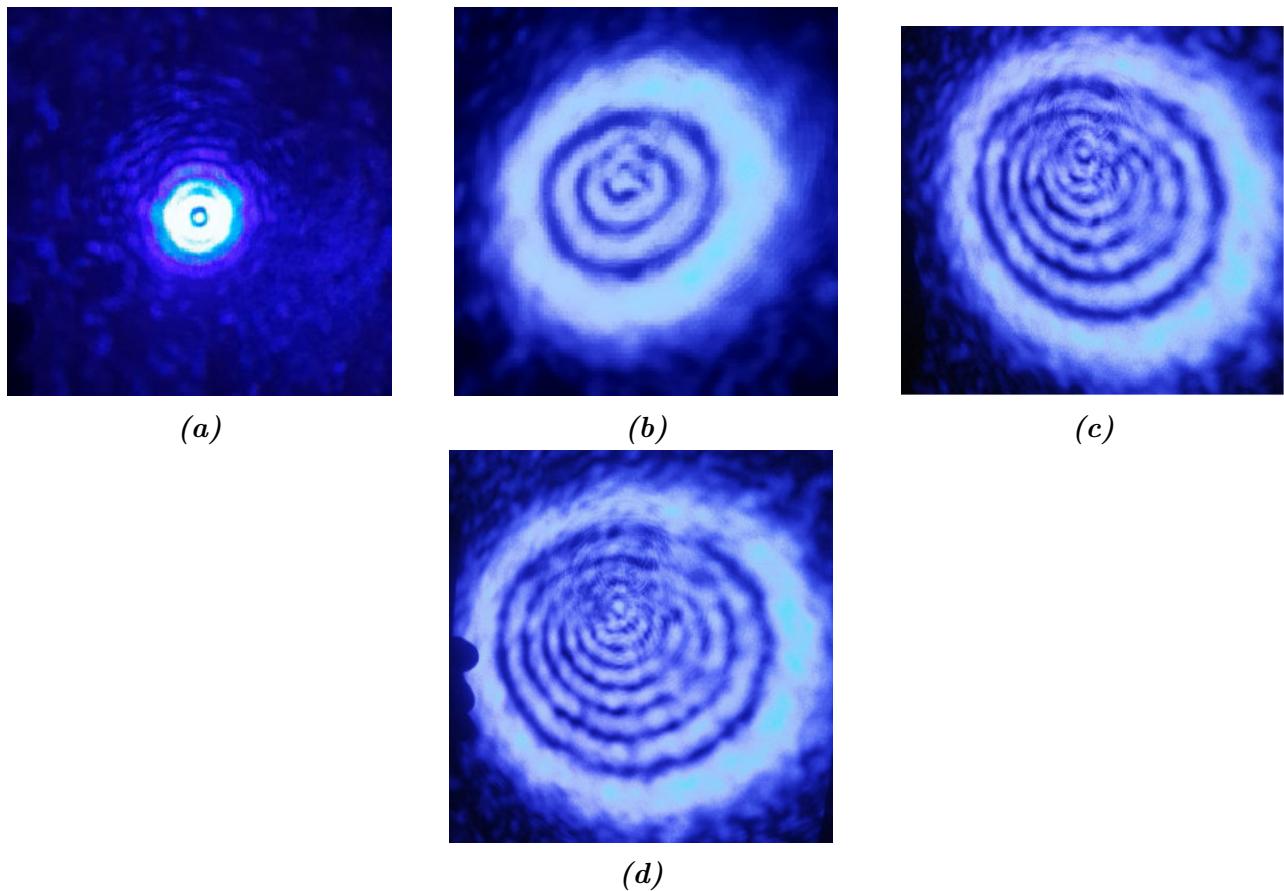


Figura 4.2. Anillos de auto-difracción obtenidos para el material orgánico a diferentes potencias de láser (a)1mW(b)10mW(c)40mW(d)50mW(e)

4.3. Grabación de rejillas en las muestras fotosensibles

En los materiales descritos en la Tabla 3.6. Se grabaron por interferencia patrones de difracción usando un láser de Argón de 477 nm, utilizando el montaje descrito en la figura 3.3. Se grabaron rejillas de 254 líneas por milímetro (l/mm) (líneas por milímetro), para muestras con un grosor de $40 \mu m$. La interferencia se observa con un objetivo amplificador. Ver Figura 4.3.

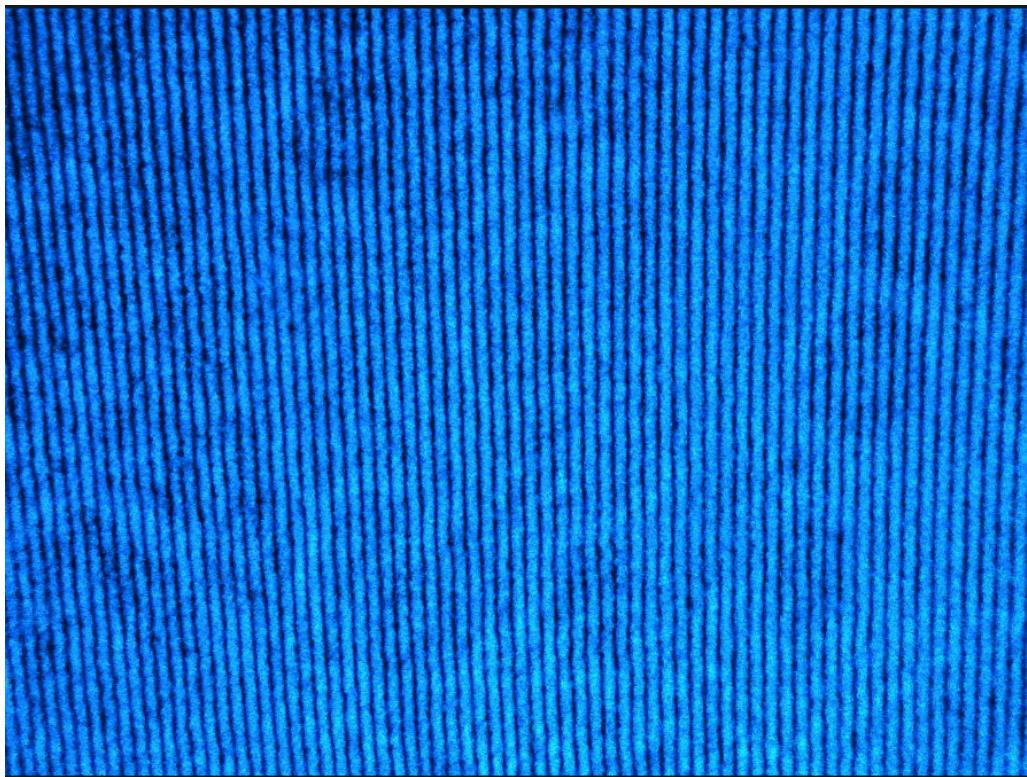


Figura 4.3. Interferencia de dos haces láser.

La eficiencia se midió mediante la presencia de los órdenes de difracción generados por el láser He-Ne, específicamente en el orden 1, como se muestra en la Figura 3.7. Observamos que la potencia de salida aumenta con respecto al tiempo. Antes de 100s, la potencia aumenta casi linealmente con respecto a la potencia de entrada. A partir de 100 segundos sigue creciendo, pero ya no de manera lineal; pareciera que tiende a ser una constante.

La eficiencia de todas las muestras se muestra en la Figura 4.4 a 4.7.

Para el análisis de cada una de las muestras se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: la concentración, la no linealidad y la potencia. Estos son los parámetros que

determinan la eficiencia de la rejilla de difracción no lineal en nuestro caso de estudio.

Potencia de láser: La potencia aplicada en el material debe ser medida para establecer el gasto energético para la grabación del holograma; a mayor gasto, mayor será el costo del mismo. Experimentalmente, se realizaron medidas a diferentes potencias.

Para cada muestra descrita en la Tabla 3.5 se realizaron cambios de los anteriores parámetros, obteniéndose los resultados en la Figura 4.4. Se puede observar que, al aumentar la potencia, aumenta la eficiencia de la rejilla de difracción, determinando así su relación directamente proporcional y lineal. Se observa que a mayor concentración, mayor es la eficiencia.

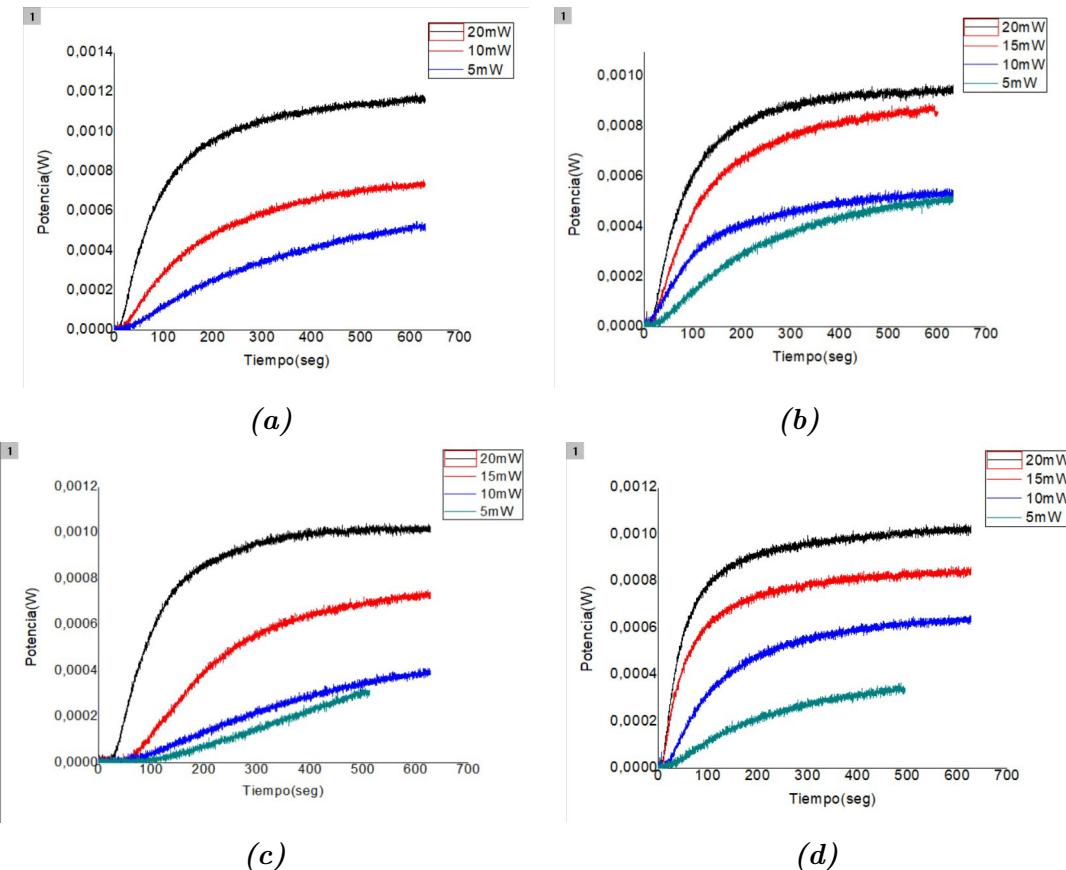


Figura 4.4. Gráficas de tiempo Vs potencia para diferentes valores de concentración del material orgánico. Imagen (a) 0.5ml de concentración, Imagen (b) 1ml de concentración, imagen (c) 1.5ml de concentración, imagen (d) 2ml de concentración

Una vez que se estudió la eficiencia para todas las muestras, analizaremos el efecto de la no linealidad inducida por el material orgánico. Primeramente, analizaremos la eficiencia en ausencia del material no lineal, en este caso la moringa. Las concentraciones fueron las

mismas, pero sin moringa. A éstas muestras las denominaremos MDPG(Muestra-Dicromato de potasio-Gelita bloom).

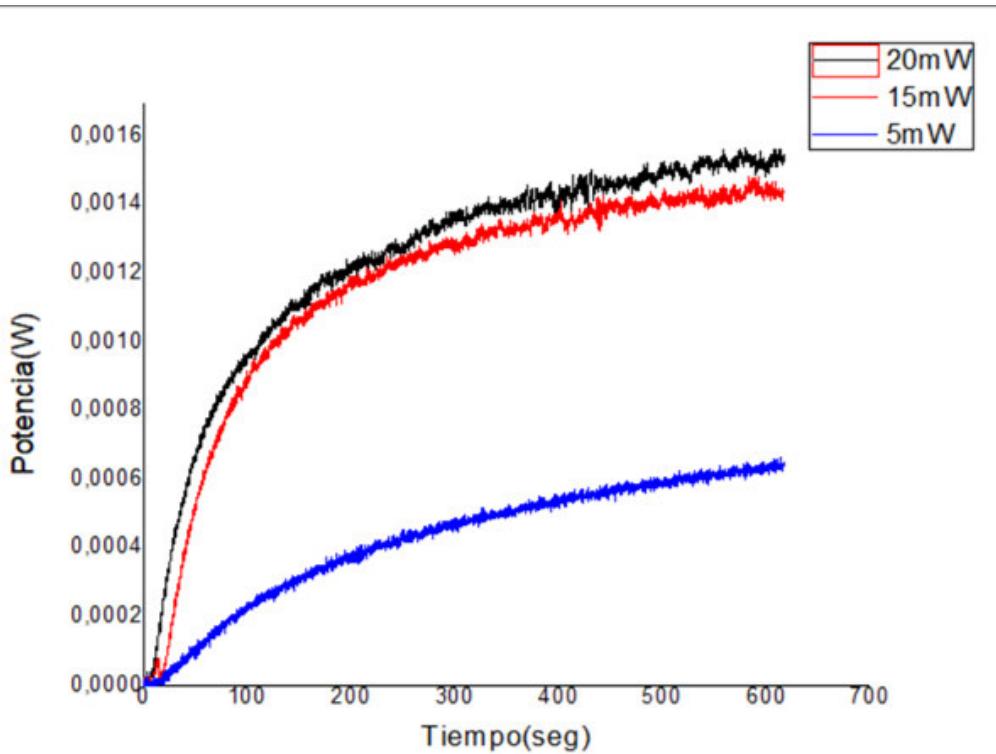


Figura 4.5. Gráficas tiempos Vs potencia, para diferentes valores de potencia con muestras en ausencia del material orgánico.

Observamos que el parámetro de la no linealidad se encuentra directamente relacionado con la eficiencia, para el caso de la muestra analizada en la Figura 4.5 tenemos que el dicromato de potasio es el único elemento no lineal, es decir, que el resultado que estamos viendo se debe mayoritariamente a su presencia.

Comparando la Figura 4.5 con la Figura 4.4, para 20mW y 15mW, se observa una mayor eficiencia para 1.6mW, si las comparamos con las gráficas de las Figuras 4.4, el mayor valor de eficiencia es aproximadamente a 1.2mW, nótese que este valor fue obtenido con la menor concentración, igual a 0.5ml.

En la Figura 4.4 iniciamos con una concentración alta de (2ml) y no se observaron sustanciales diferencias en la eficiencia de la rejilla comparada con las rejillas que no contienen el material orgánico de la Figura 4.5. Por lo tanto, el siguiente paso fue analizar la influencia de la concentración de moringa en la rejilla de difracción no lineal, para lograrlo, bajamos

la solución a 0.2ml, esta solución la denominamos MMDPG (Muestra-Moringa-Dicromato de potasio-Gelita bloom) Los resultados se muestran en la Figura 4.6 y corresponden a la línea verde. Obsérvese cómo aumenta la eficiencia a partir de 300s y con solo 5 mW. Esto se explica porque la concentración juega un papel importante en la eficiencia.

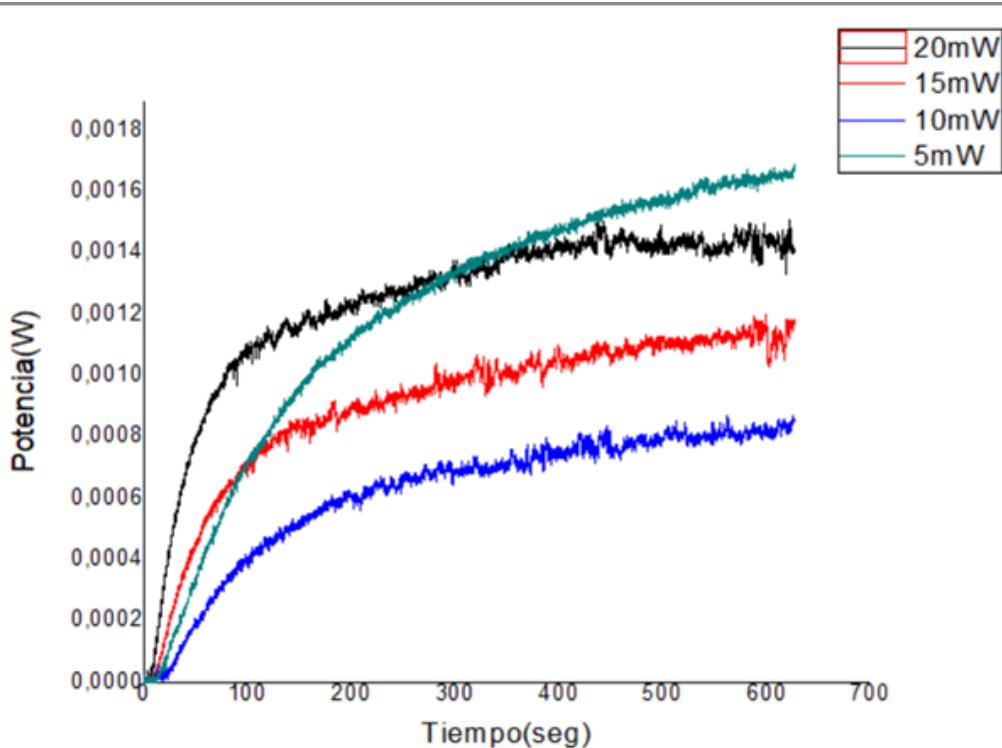


Figura 4.6. Gráficas tiempo Vs potencia Gráficas obtenidas con una solución de 0.2ml del material orgánico.

Con el fin de comparar las gráficas de la Figura 4.5 que se consiguieron con muestras en ausencia de material orgánico, en relación con la gráfica en la figura 4.6 específicamente en 5mW, donde presento una impresionante estabilidad a lo largo del tiempo y una potencia del primer orden igual 1.7mW sorprendentemente superior al resto de muestras que son esencialmente la misma concentración de 0,2ml. Procedemos a observar la Figura 4.7.

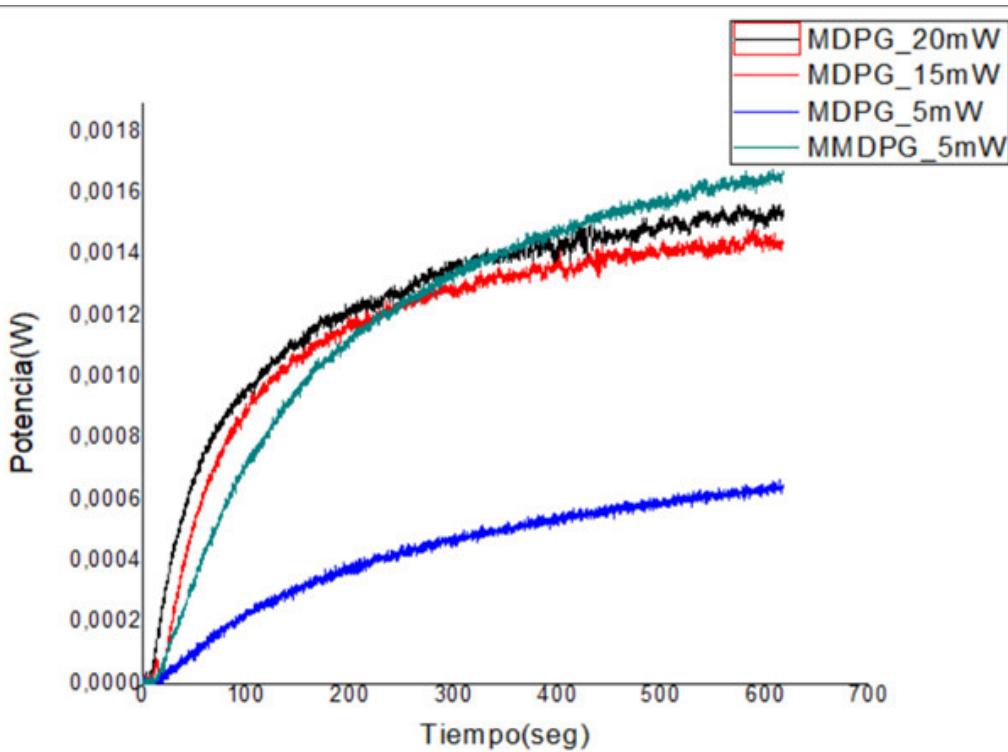


Figura 4.7. Gráficas tiempo Vs potencia donde se compara muestras en ausencia del material orgánico Vs muestras con presencia del material orgánico.

Para que la rejilla en el material orgánico mejore a las otras, determinamos que es posible con una concentración de 0.2 ml de moringa. En este caso, la potencia a la cual se logra es muy baja, 0.5 mW, lo cual la hace sumamente atractiva para aplicaciones en holografía, almacenamiento de datos, aunando un evidente ahorro de energía.

Finalmente, en la Figura 4.8, vemos que la eficiencia obtenida en el caso de nuestro experimento, el mejor resultado fue del 10 % para una potencia máxima de 5mW. Es evidente que los resultados obtenidos aquí son excepcionalmente buenos en comparación con los resultados existentes en [George, 2017]. Donde, si bien lograron obtener una eficiencia del 27,26 % para la muestra HS3, pero con una potencia de grabado equivalente a 195mW, agregando que se utilizó una mayor concentración del material orgánico Hibiscus Sabdariffa 1.5 ml. Igualmente, comparamos con los resultados obtenidos en el trabajo [de León et al., 2021] donde alcanzaron una eficiencia del 19 % con una potencia de 60mW y una concentración de 1ml, la cual sigue siendo un gasto de energía mayor comparado con los 5mW de potencia al igual que los 0,2ml de concentración en nuestro mejor resultado.

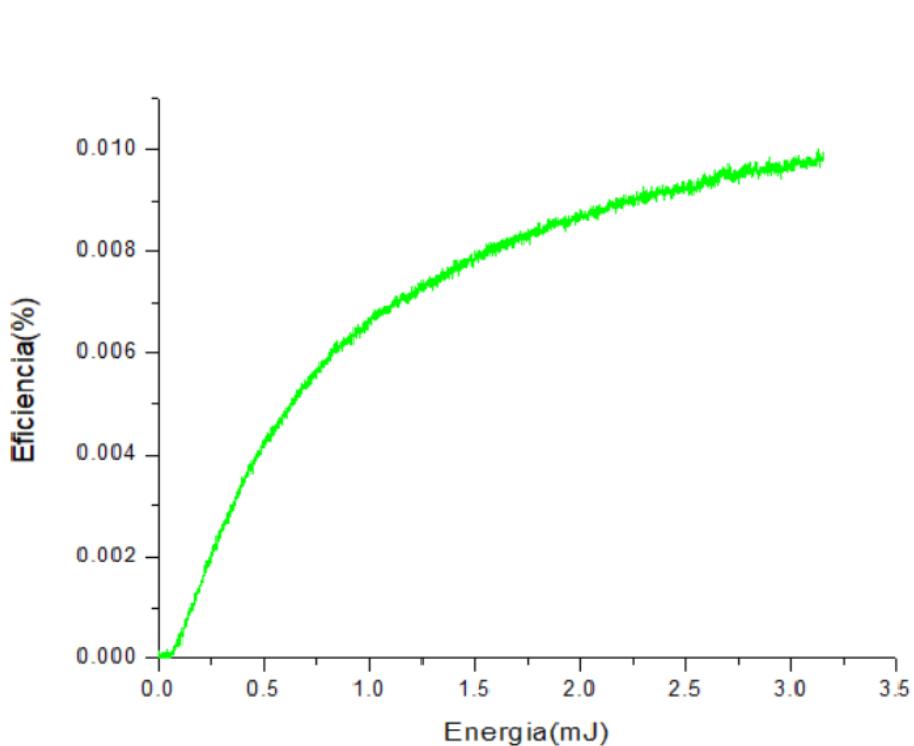
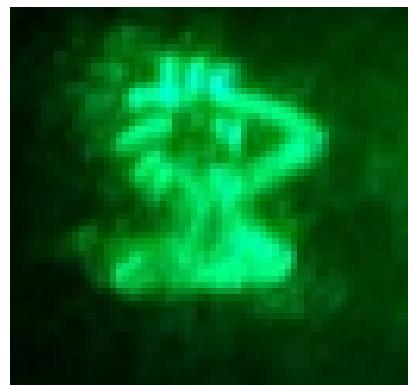


Figura 4.8. Gráfica de Energía Vs Eficiencia.

Por lo tanto, concluimos lo siguiente, la eficiencia de una rejilla de difracción puede mejorar si se utiliza una concentración adecuada. Para la moringa encontramos que para 0.2 ml de moringa la eficiencia es óptima.

4.4. Grabación de holograma

Una vez que se realizó exitosamente el grabado de una rejilla de difracción en materiales no lineales orgánicos, se muestra el grabado y fabricación de un holograma. Como describimos anteriormente, la muestra con menor concentración de moringa y baja potencia mostró los mejores resultados, por lo tanto, se graba un holograma con el montaje descrito en el capítulo 3, dando como resultado el holograma mostrado en la Figura 4.10.



(a)

Figura 4.9. Holograma grabado .

CAPÍTULO 5

Conclusiones y trabajo futuro

Encontramos que la concentración, la no linealidad, la potencia y también la longitud de onda. Es decir, el tipo de láser que se use influye en la eficiencia de una rejilla y en la fabricación de un holograma, de la misma forma que los diferentes parámetros mencionados.

La no linealidad nos ayuda a fabricar rejillas de difracción no lineales eficientes que requieren baja potencia y baja concentración, lo cual disminuye costos de inversión.

Los ajustes para obtener las gráficas mediante la técnica de Z-scan se realizaron con el ajuste de lente térmica.

Debido a que usamos un láser continuo, el cambio de índice de refracción no lineal es por temperatura, lo cual se manifiesta en el material por una fuerte absorción.

La muestra cero o muestra base utilizada también presenta otros efectos de no linealidad de tercer orden, con la excepción que para el éxito de nuestra investigación fueron superados por el material orgánico utilizado.

Se acondicionaron diferentes arreglos experimentales para la caracterización de los materiales y muestras utilizadas, de tal forma que se pudieran obtener resultados en corto

tiempo bajo parámetros que pueden ser repetibles de forma sencilla en nuestros laboratorios de la Universidad de Guanajuato, sede DICIS.

Se logró con éxito caracterizar un material orgánico idóneo para las necesidades requeridas de la industria tecnológica e investigación. Esto se debe a que cumple con los objetivos mundiales de promover la utilización de materiales amigables con el medio ambiente, de bajo costo, abundantes y alta eficiencia, todo esto, con el fin de disminuir el precio de producción.

El material orgánico seleccionado para la investigación, la moringa oleifera, cuenta con la gran ventaja de ser una planta que puede germinar y desarrollarse rápidamente en muy poco tiempo, de igual manera presenta una idónea resistencia a condiciones climatológicas extremas, como sequías, haciéndola ejemplar para su producción en diferentes zonas geográficas.

La investigación arrojó que la moringa oleifera es una planta que posee propiedades ópticas no lineales relevantes, esto incluye su capacidad para absorber y transmitir luz en diferentes longitudes de onda.

Se determinó que en la región del espectro visible, dentro del rango de 400-680nm la moringa oleifera tiende a absorber, siendo para nuestro caso utilizada la $\lambda = 528nm$, todo lo anterior, debido a la presencia en su estructura de pigmentos clorofílicos junto a los flavonoides responsables de ser catalizadores en el transporte de electrones. Para el caso de la transmisión el espectro se encontró de igual forma dentro de la región visible en el rango de 500-700nm, siendo para nuestro caso una $\lambda = 633nm$, donde las hojas permiten el paso de la luz.

Es importante resaltar que nuestra investigación se realizó con el material disponible en el laboratorio, por ende la utilización de láseres dentro del rango visible.

Es posible aumentar la eficiencia de una rejilla de difracción si se graba en un material no lineal.

El material o muestra se fabricó con únicamente tres componentes de bajo coste, que son: agua destilada, gelita bloom, dicromato de potasio y la moringa, encapsulados entre dos portaobjetos de microscopio para controlar el grosor.

Derivado de la eficiencia alcanzada por el material nuevo, podría utilizarse en una amplia variedad de aplicaciones holográficas, como en la holografía en tiempo real. Además, si se aplican algunas modificaciones como añadir glicerol o algún colorante al material, se podría prolongar la vida útil y aumentar el rango de sensibilidad del material.

El material analizado, representa el prospecto de un material orgánico interesante, lo que sugiere que su uso es viable para la producción masiva de rejillas de difracción no lineales para la grabación holográfica con pocos requisitos y a bajo coste en cualquier laboratorio e industria.

5.1. Trabajo futuro

El trabajo de tesis puede ser mejorado en diferentes aspectos, entre los que se tiene:

Se propone trabajar con rejillas aperiódicas, por medio de la modificación de las distancias de los componentes ópticos en el montaje de grabación de rejillas.

Encontrar una forma de mantener la temperatura, humedad y calibración de los componentes ópticos constante durante todo el proceso.

Trabajar con láseres en la región UV (ultravioleta), ya que en esa región se espera presenta picos de absorción que mejoren su eficiencia.

Debido a que los resultados mejores se obtuvieron a potencias bajas emitidas por el láser de Argón, sería relevante observar el comportamiento para potencias por debajo de los 5 mW.

Condiciones experimentales, como la forma en la que se preparan las muestras con el material orgánico utilizado, en este caso la moringa oleifera (fresco, seco o triturado).

Realizar un estudio teórico que incluya la contribución de la no linealidad.

Referencias

- [Aguilar and López, 2004] Aguilar, J. H. A. and López, L. M. (2004). *Holografía básica*. Instituto Politécnico Nacional.
- [Bass, 1995] Bass, M. (1995). *Handbook of Optics: Fiber Optics and Nonlinear Optics*. McGraw-Hill.
- [Bredas et al., 1994] Bredas, J. L., Adant, C., Tackx, P., Persoons, A., and Pierce, B. (1994). Third-order nonlinear optical response in organic materials: theoretical and experimental aspects. *Chemical reviews*, 94(1):243–278.
- [Caicedo, 2017] Caicedo, L. (2017). Caracterización química y nutracéutica de la fracción no digerible de hojas de moringa (moringa oleífera) y su efecto en el perfil citotóxico de células de cáncer de colon humano ht29. *Universidad autónoma de Querétaro*.
- [Cano-Lara et al., 2017] Cano-Lara, M., Severiano-Carrillo, I., Trejo-Durán, M., and Alvarado-Méndez, E. (2017). Evolution of diffraction and self-diffraction phenomena in thin films of gelite bloom/hibiscus sabdariffa. *Journal of Modern Optics*, 64(17):1793–1799.
- [Chen et al., 2023] Chen, P., Xu, X., Wang, T., Zhou, C., Wei, D., Ma, J., Guo, J., Cui, X., Cheng, X., Xie, C., et al. (2023). Laser nanoprinting of 3d nonlinear holograms beyond 25000 pixels-per-inch for inter-wavelength-band information processing. *Nature Communications*, 14(1):5523.

- [Claver, 2023] Claver, S. P. (2023). *Estudio bioquímico y biológico de nuevos extractos proteicos de plantas alimentarias: Potencial aplicación como agentes anticoagulantes, hipoglucemiantes, antioxidantes y anti-infectivos naturales.* PhD thesis, Universidad Nacional de La Plata.
- [Dartora et al., 2011] Dartora, C., Nobrega, K., Matielli, M. H. K., Campos, F. K. R. d., and Santos Filho, H. (2011). Basic concepts on diffraction and dispersion of electromagnetic waves. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33:1307.
- [de León et al., 2021] de León, Y. P., Flores, B. M., Ortiz-Gutiérrez, M., Torres, J. C. I., and Cortes, M. P. (2021). Real-time characterization of gelatin doped with potassium dichromate as a photosensitive material. *Optik*, 242:167310.
- [Del Coso, 2004] Del Coso, R. & Solis, J. (2004). Relation between nonlinear refractive index and third-order susceptibility in absorbing media. *JOSA B*, 21 (3):640–644.
- [Eaton, 1991] Eaton, D. F. (1991). Nonlinear optical materials. *Science*, 253(5017):281–287.
- [G.Arguello, 2022] G.Arguello (2022). *Analisis experimental de rejillas de difracción con materiales orgánicos no lineales para la generación de hologramas.* Msc, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Salamanca. Available at <https://example.com/thesis.pdf>.
- [George, 2017] George (2017). *Análisis experimental de rejillas de difracción con materiales orgánicos no lineales para la generación de hologramas.* Master's thesis, Universidad de Guanajuato, Mexico.
- [González, 1997] González, G. (1997). Series de fourier, transformadas de fourier y aplicaciones. *Divulgaciones matemáticas*, 5(1/2):43–60.
- [Goodman, 2015] Goodman, J. W. (2015). *Statistical optics.* John Wiley & Sons.
- [Gutiérrez et al., 2016] Gutiérrez, M. O., Torres, J. C. I., Verduzco, M. A. S., Cortés, M. P., and Muñoz, R. E. O. (2016). Caracterización de la gelatina de pescado dicromatada como material fotosensible. *Ciencia Nicolaita*, (67):84–95.
- [Haddow,] Haddow, M. La nueva definición de cristal o cómo ganar un premio nobel understand article.
- [Henari et al., 2013] Henari, F., Cassidy, S., Jasim, K. E., and Dakhel, A. (2013). Nonlinear refractive index measurements of curcumin with cw laser. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 22(02):1350017.

- [Huang and Yu, 2007] Huang, J.-P. and Yu, K. (2007). *New nonlinear optical materials: theoretical research*. Nova Publishers.
- [Innocenzi and Lebeau, 2005] Innocenzi, P. and Lebeau, B. (2005). Organic–inorganic hybrid materials for non-linear optics. *Journal of Materials Chemistry*, 15(35-36):3821–3831.
- [Lara et al., 2007] Lara, E. R., Meza, Z. N., Castillo, M. D. I., Palacios, C. G. T., Panameño, E. M., and Carrasco, M. L. A. (2007). Influence of the photoinduced focal length of a thin nonlinear material in the z-scan technique. *Optics express*, 15(5):2517–2529.
- [Liu et al., 2001] Liu, X., Guo, S., Wang, H., and Hou, L. (2001). Theoretical study on the closed-aperture z-scan curves in the materials with nonlinear refraction and strong nonlinear absorption. *Optics communications*, 197(4-6):431–437.
- [Maiman, 1960] Maiman, T. (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical review letters*, 4(11):564.
- [Marinescu, 2018] Marinescu, M. (2018). Synthesis and nonlinear optical studies on organic compounds in laser-deposited films. *Applied Surface Science*.
- [Mazzoldi, 1978] Mazzoldi, P. (1978). *Tecniche di indagine nel campo dei materiali: Bressanone, 28-30 giugno 1976*. Università degli studi di Padova. Istituto di fisica.
- [Moon et al., 2006] Moon, T., Wilkinson, J. M., and Cavanagh, H. M. (2006). Antiparasitic activity of two lavandula essential oils against giardia duodenalis, trichomonas vaginalis and hexamita inflata. *Parasitology research*, 99:722–728.
- [Motiei et al., 2017] Motiei, H., Jafari, A., and Naderali, R. (2017). Third-order nonlinear optical properties of organic azo dyes by using strength of nonlinearity parameter and z-scan technique. *Optics & Laser Technology*, 88:68–74.
- [Numan et al., 2022] Numan, N., Jeyaram, S., Kaviyarasu, K., Neethling, P., Sackey, J., Kotsedi, C., Akbari, M., Morad, R., Mthunzi-Kufa, P., Sahraoui, B., et al. (2022). On the remarkable nonlinear optical properties of natural tomato lycopene. *Scientific Reports*, 12(1):9078.
- [Olson and Fahey, 2011] Olson, M. E. and Fahey, J. W. (2011). Moringa oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4):1071–1082.
- [Palmer and Loewen, 2005] Palmer, C. and Loewen, E. G. (2005). Diffraction grating handbook.

- [Paschotta, 2006] Paschotta, R. (2006). Nonlinear index. *RP Photonics Encyclopedia*.
- [Patra et al., 2012] Patra, A., Chandaluri, C. G., and Radhakrishnan, T. (2012). Optical materials based on molecular nanoparticles. *Nanoscale*, 4(2):343–359.
- [Ramirez et al., 2010] Ramirez, E. G., Carrasco, M. A., Otero, M. M., Cerda, S. C., and Castillo, M. I. (2010). Far field intensity distributions due to spatial self phase modulation of a gaussian beam by a thin nonlocal nonlinear media. *Optics express*, 18(21):22067–22079.
- [Saleh and Teich, 2019] Saleh, B. E. and Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics*. john Wiley & sons.
- [Severiano-Carrillo et al., 2017] Severiano-Carrillo, I., Alvarado-Méndez, E., Trejo-Durán, M., and Méndez-Otero, M. (2017). Improved z-scan adjustment to thermal nonlinearities by including nonlinear absorption. *Optics Communications*, 397:140–146.
- [Severiano Carrillo et al., 2013] Severiano Carrillo, I., Méndez Otero, M. M., Arroyo Carrasco, M. L., and Iturbe Castillo, M. D. (2013). Comparison of different models employed to describe the z-scan curves for thick nonlinear optical media. *Journal of Modern Optics*, 60(3):248–254.
- [Sheik-Bahae et al., 1989] Sheik-Bahae, M., Said, A. A., and Van Stryland, E. W. (1989). High-sensitivity, single-beam n 2 measurements. *Optics letters*, 14(17):955–957.
- [Sundari and Palanisamy, 2006] Sundari, R. M. and Palanisamy, P. (2006). Self-diffraction and z-scan studies in organic dye doped thin films. *Applied surface science*, 252(6):2281–2287.
- [Svelto, 1982] Svelto, O. (1982). La grande scienza. i laser.
- [Wang et al., 2019] Wang, A., Li, C., Zhang, J., Chen, X., Cheng, L., and Zhu, W. (2019). Graphene-oxide-supported covalent organic polymers based on zinc phthalocyanine for efficient optical limiting and hydrogen evolution. *Journal of colloid and interface science*, 556:159–171.
- [Yao et al., 2021] Yao, W., Zhou, C., Wang, T., Chen, P., Xiao, M., and Zhang, Y. (2021). Angle-multiplexing nonlinear holography for controllable generations of second-harmonic structured light beams. *Frontiers in Physics*, 9:751860.