

# **HOLOPIXEL**

*Estudio de la factibilidad de implementar la tecnología para el  
registro de hologramas de matriz de puntos*

**Alejandro González Villegas**

Asesor:

M. Sc. Daniel Velásquez Prieto

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al  
título de Magister en Física Aplicada

Énfasis en Profundización

Grupo de Óptica Aplicada  
Departamento de Ciencias Físicas

Universidad EAFIT

Mayo 2016

# Resumen

En este trabajo se presenta la investigación realizada con el objeto de determinar la factibilidad tecnológica para el registro de los hologramas de matriz de punto utilizados ampliamente en la industria de las artes gráficas como elementos de seguridad en la lucha contra la piratería y la falsificación de productos.

Para ello se estudian y presentan los fundamentos ópticos de las rejillas de difracción que los conforman, derivando los métodos que permiten el cálculo a partir de condiciones establecidas de iluminación y reconstrucción.

A partir de dichos métodos se desarrollan y se ponen en funcionamiento sistemas y arreglos experimentales completos, que involucran el software para el control de los dispositivos mecánicos, para el manejo y diseño de las imágenes, y adicionalmente la óptica propiamente dicha.

Los sistemas de esta forma implementados, que permiten la generación y registro de las rejillas, son puestos a prueba y se presentan los resultados tomando como parámetro la medición de los espectros generados por difracción.

Finalmente se presentan y evalúan varios ejemplos típicos de la aplicación de los hologramas de seguridad generados en el sistema desarrollado.

*A mis tres corazones.*

# Agradecimientos

Al mirar en retrospectiva el presente trabajo de investigación y en general todo el proyecto de realización de la maestría en física aplicada, aparecen sentimientos de profundo agradecimiento a numerosas personas que hicieron que emprender este proyecto fuera posible, en especial quiero mencionar y hacer explícito mi agradecimiento a:

Don Vicente Ferrer M. y Dr. Fernando Zuluaga G. en C.I: ARclad S.A., quienes con su apoyo y soporte hicieron posible enfrentar este proyecto.

Profesor Daniel Velásquez, en la Universidad EAFIT, tutor de esta investigación, quien con su guía, consejo y dirección, me brindó soporte de manera constante, además de una hoja de ruta que hizo de este trabajo un proyecto lleno de aprendizajes y descubrimientos. De igual manera al Profesor René Restrepo por su continua voz de apoyo y aliento, además de sus visitas que siempre sembraron elementos nuevos a considerar.

A los compañeros del grupo de Óptica, por su ayuda desinteresada y cordial con la que me ayudaron a salvar uno que otro escaño en el desarrollo del proyecto.

Y Finalmente a mi Familia, Martha, Pedro Alejandro y María Catalina, que me brindaron apoyo y paciencia, que con sus preguntas, sus caras de asombro y orgullo siempre me llenaron de ánimo y entusiasmo.

# Contenido

<b>Resumen</b> .....	2
<b>Agradecimientos</b> .....	4
<b>Contenido</b> .....	5
<b>Lista de figuras</b> .....	8
<b>Lista de tablas</b> .....	11
<b>Introducción</b> .....	12
<b>1. Planteamiento del Problema</b> .....	14
1.1 Objetivos .....	17
1.1.1 Objetivo General. ....	17
1.1.2 Objetivos Específicos. ....	17
<b>2. Estado del arte</b> .....	18
2.1 Concepto de seguridad. ....	18
2.1.1 Elementos de seguridad por interferencia (ISIS) .....	21
2.1.2 Dispositivos difractivos de imagen ópticamente variables (DDIOV).....	21
2.1.2.1 Elementos de orden cero (ZOD) .....	21
2.1.2.2 Elementos de primer orden (FOD).....	22

2.2 Proceso de fabricación de hologramas de matriz de puntos por repujado (embossing).....	24
2.2.1 Registro .....	24
2.2.2 Platedo .....	27
2.2.3 Electroformado.....	27
2.2.4 Recombinación.....	28
2.2.5 Estampado .....	29
2.3 Tecnología de generación hologramas de punto .....	30
<b>3. Fundamentos Físicos de la Holografía de Puntos.....</b>	<b>34</b>
3.1 Cálculo de micro redes difractivas .....	34
3.1.1 Generación de Franjas de interferencia.....	35
3.1.2 Registro de patrón de interferencia. ....	40
3.1.3 Reconstrucción.....	41
<b>4. Implementación Experimental.....</b>	<b>45</b>
4.1 Modelo óptico .....	45
4.1.1 Configuración del sistema óptico. ....	45
4.1.2 Sistema Mecánico. ....	48
4.1.3 Software. ....	48
4.2 Modelo opto electrónico.....	51
4.2.1 Principio óptico .....	51
4.2.2 Sistema Mecánico. ....	53
4.2.3 Software .....	53
4.3 Algoritmos.....	54
<b>5. Resultados Experimentales.....</b>	<b>58</b>
5.1 Modelo Óptico .....	58
5.1.1 Montaje .....	58

5.1.2	Parámetros de ensayos .....	59
5.1.3	Resultados .....	61
5.2	Modelo Opto Electrónico .....	68
5.2.1	Montaje .....	68
5.2.2	Parámetros de ensayos .....	69
5.2.3	Resultados .....	70
<b>6.</b>	<b>Aplicaciones.</b> .....	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b> .....	<b>84</b>
7.1	Conclusiones .....	84
7.2	Trabajo Futuro.....	86
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>87</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Vista al microscopio de un arreglo de micro rejillas [10].....	16
Figura 2. Impresión de microtexto y microlíneas, comparado con una copia realizada en una fotocopiadora de alta resolución. [11].....	19
Figura 3. Textos encriptados utilizando principios moiré.....	20
Figura 4. Principio de fabricación de estructuras basadas en el orden cero [17] .....	22
Figura 5. Relación del nivel de seguridad con la resolución de la impresión. [11].....	24
Figura 6. Producción del máster en la placa fotosensible (fotoresist) [8]. .....	25
Figura 7. Imagen de sistema de registro de matriz de puntos, variando el ángulo de incidencia y el ángulo entre los dos haces de luz se generan redes de difracción con diferente orientación y frecuencia de las líneas de interferencia [24]. .....	26
Figura 8. Imagen de los holopixeles conteniendo redes de difracción grabados por el método de matriz de puntos [5]. .....	27
Figura 9. Imagen de equipo de electroformado para fabricación shim (láminas metálicas con los relieves correspondientes al registro holográfico) [25].....	28
Figura 10. Imagen de prensa para fabricación completa del arte por combinación de shims o láminas con holograma. [25].....	29
Figura 11. Imagen del elemento que transfiere por presión y temperatura el holograma a la película plástica. [25].....	30
Figura 12. Imagen de un holograma de seguridad constituido por varios elementos. [19].....	30
Figura 13. Diagrama funcional de un sistema de generación de hologramas de punto .....	31
Figura 14. Esquema de la configuración óptica del sistema Sparkle. Los principales parámetros de las rejillas, periodo, orientación y tamaño pueden ser controlados con variación de la posición de los elementos ópticos. ....	32

Figura 15. Esquema óptico basado en un SLM para generar rejillas de difracción de Holomax [23]. .....	33
Figura 16. Haz de luz plano K de longitud de onda $\lambda$ , amplitud A y ángulos $\alpha, \beta, \gamma$ con respecto a los ejes X,Y,Z.....	35
Figura 17. Dos haces de luz planos propagándose sobre un plano de incidencia e interfiriendo en un punto.....	36
Figura 18. Componentes $d_x$ y $d_y$ de la separación d en los ejes x, y. ....	38
Figura 19. Formación de la rejilla de difracción cuando el plano de incidencia de los haces K1 y K2 presenta una rotación $\Phi$ .....	39
Figura 20. Caso especial de dos haces $K_1$ $K_2$ con ángulo de incidencia simétrico.....	40
Figura 21. Comportamiento de la difracción de luz blanca ante diferentes rejillas. ....	44
Figura 22. Arreglo óptico para generación y registro de puntos con rejilla de difracción. ....	46
Figura 23. Detalle del montaje óptico. ....	47
Figura 24. Detalle del montaje óptico, vista superior.....	47
Figura 25. Pantalla principal de interface de calibración de Software dot matrix.....	48
Figura 26. Puntos grabados sobre papel térmico usado para la calibración de movimientos. ....	49
Figura 27. Pantalla de interface DotHolo, para dibujar arreglo de puntos con su color deseado.....	50
Figura 28. Interface de Registro para el control de la grabación punto a punto mostrando el avance del registro.....	51
Figura 29. Generación de micro rejillas de difracción con dos haces formados en el SLM. ....	52
Figura 30. Influencia de los parámetros de la imagen proyectada en el modulador espacial sobre las formación de rejillas de difracción.....	53
Figura 31. Interface de control, calibración y posicionamiento del sistema. ....	54
Figura 32. Procesamiento de parámetros numéricos a partir de una imagen. ....	55
Figura 33. Tratamiento de archivos de imágenes.....	56
Figura 34. Esquema general de algoritmo de control de registro.....	57
Figura 35. Montaje óptico realizado para el desarrollo experimental. ....	58
Figura 36. Registro de rejillas con diferentes orientaciones.....	59
Figura 37. Montaje óptico utilizado para la medición del espectro generado.....	61
Figura 38. Espectro observado a $26.5^\circ$ .....	64
Figura 39. Espectro observado a $28^\circ$ .....	64
Figura 40. Espectro observado a $29.5^\circ$ .....	65
Figura 41. Espectro observado a $30^\circ$ .....	65

Figura 42. Espectro observado a 30.5°.....	66
Figura 43. Imagen obtenida en el SEM a 15000X.....	67
Figura 44. Detalle del montaje para la evaluación del modelo Opto electrónico.....	68
Figura 45. Parámetros de figura a registrar. ....	70
Figura 46. Imagen del registro de cuadrados de longitudes de onda (de arriba abajo) 470nm, 535nm, 590nm, 630nm. ....	71
Figura 47. Detalle de los holopixel registrados para cada cuadrado con iluminación frontal a la izquierda e iluminación a 30° a la derecha.....	72
Figura 48. Espectro cuadrado 1 Azul. ....	73
Figura 49. Espectro del cuadrado 2 Verde. ....	73
Figura 50. Espectro del cuadrado 3 Amarillo.....	74
Figura 51. Espectro del cuadrado 4 Rojo. ....	74
Figura 52. Ensayo del escudo de UNIVERSIDAD EAFIT. ....	79
Figura 53. Efecto fondo logo en logo EAFIT cuando es observado desde diferentes ángulos. ....	80
Figura 54. Logo EAFIT, variando la posición de observación. ....	81
Figura 55. Detalle de los canales de rejillas encendidas y apagadas.....	81
Figura 56. Efecto fondo o logo en logo ARclad cuando es observado desde diferentes ángulos. ...	82

## Lista de tablas

Tabla 1. Longitudes de onda $\lambda$ seleccionada para la paleta de colores. ....	50
Tabla 2. Variables de entrada para ensayo de registro. ....	60
Tabla 3. Parámetros de ajuste para el montaje óptico. ....	60
Tabla 4. Parámetros de exposición. ....	60
Tabla 5. Imágenes de los dots a diferentes ángulos de observación. ....	63
Tabla 6. Relación de resultados esperados vs resultados obtenidos. ....	67
Tabla 7. Variables de registro para ensayo. ....	69
Tabla 8. Parámetros de registro y revelado. ....	70
Tabla 9. Comparación de longitudes de onda esperados vs obtenidos. ....	75
Tabla 10. Diseño de aplicaciones en logos. ....	77

# Introducción

En los últimos años las compañías productoras de bienes y servicios están librando una batalla continua contra la llamada industria de la piratería y la falsificación de sus productos, que no solo representa pérdidas millonarias en las ventas de sus productos, sino en otros perjuicios como el deterioro de la imagen de calidad y concepto de desempeño, al llegar a manos de los consumidores copias que no cumplen con los estándares de los productos originales.

En dicha batalla la industria del empaque y especialmente el segmento relativo a las etiquetas de seguridad encontró en la física y especialmente en las estructuras difractivas, cuyos principios han sido estudiados y desarrollados por la óptica moderna, un recurso muy valioso e importante en el desarrollo de nuevos elementos de seguridad. Estas estructuras difractivas se pueden configurar para conformar elementos o dispositivos ópticamente variables, es decir es posible diseñarlas para formar imágenes dinámicas y con variaciones en función de la clase de iluminación, su posición y la del observador, que por definición no es posible copiarlas por los medios tradicionales de impresión que capturan y forman imágenes fijas y estáticas.

De esta forma la Óptica ha brindado una herramienta tecnológica de acceso relativamente complejo y limitado que permite generar elementos que agregados al empaque o, a los productos mismos, les confiere un sello distintivo de autenticidad y originalidad.

El presente trabajo de investigación está dividido en tres partes: en la primera de ellas se realiza una revisión del estado de arte de las tecnologías usadas actualmente en la industria del empaque en la lucha contra la falsificación y cumplir con el objetivo de marcar y distinguir el producto como original, haciendo un énfasis especial en los sistemas basados en principios ópticos.

La segunda parte presenta los fundamentos físicos y ópticos en los que se basan los hologramas de matriz de puntos y se revisan además las tecnologías usadas para su generación y registro.

Finalmente, la tercera parte describe los sistemas desarrollados e implementados (óptica, software y hardware) para evaluar la capacidad tecnológica de varios de los enfoques técnicos existentes, se presentan y analizan los resultados obtenidos en los diversos experimentos diseñados y unos ejemplos de aplicaciones típicas.

# 1. Planteamiento del Problema

Las etiquetas y los empaques tienen la función primordial de proteger los productos del medio ambiente y ser portadores de información básica relativa a ellos, por ejemplo el fabricante, la marca, el nombre, contenido, fechas de vencimiento o fabricación, etc., y es así como en casi todos los momentos de la vida actual estamos en contacto con una etiqueta, ya sea en el momento de comprar un producto, en un almacén o un mercado, al enviar o recibir un paquete, etc.

Con la evolución y globalización de los mercados, las etiquetas ya no cumplen la única función de ser elementos portadores de información, sino que proveen medios de brindar diferenciación a través de contenidos de alto valor estético con características adicionales que garantizan la originalidad y autenticidad del producto, en una lucha contra las falsificaciones y la piratería, esto se observa en todos los tipos de mercado, tales como licores, fármacos, textiles, tecnología, etc. En el área logística brindan un enlace rápido y eficiente entre los productos y los sistemas de información a través de códigos de barras o sistemas RFID (siglas de Radio Frequency IDentification) que vuelven al producto y la etiqueta un solo elemento. La funcionalidad de las etiquetas cada vez se expande más y ya es común ver etiquetas “sensores” que con tintas especializadas son capaces de detectar humedad, temperatura, o contacto con sustancias específicas; también con el desarrollo de la electrónica impresa, son comunes hoy en día en el mercado etiquetas que desempeñan funciones “inteligentes” a través de circuitos electrónicos y fuentes de energía impresas en ellas.

En los últimos años, especialmente luego de la invención de la holografía y el desarrollo de técnicas de replicación masiva de hologramas basados en el microrepujado (microembossing), la creciente necesidad de autenticidad del producto; ha adoptado esta técnica en una lucha contra las falsificaciones y la piratería, en todos los tipos de mercado, tales como licores,

fármacos, textiles, tecnología, etc. Anualmente se reportan pérdidas cuantiosas por la venta de productos de élite pirateados y lo que es más grave aún daños a la salud por licores o medicamentos falsificados que incluso llegan a cobrar vidas humanas.

En este aspecto los materiales holográficos han ganado una alta participación al combinar un contenido de alto valor estético que captura la atención del consumidor y diferencia el producto, con una función de seguridad, dada la alta dificultad tecnológica para su replicación y la imposibilidad de copia por medios convencionales de impresión, ya sea digital o análogo, dado que su principio óptico no es por reflexión de la luz, sino la difracción creando lo que se denomina dispositivos difractivos de imagen ópticamente variables (DDIOV) [1], [2].

Desde la invención de la Holografía de Matriz de Punto (HMP) por Frank Davis en 1988 [3] se ha desarrollado un nicho de mercado para etiquetas y empaques usando esta tecnología [4], las cuales son generadas para que un observador pueda percibir algunos efectos visuales tales como visibilidad-invisibilidad, variación de colores, estereogramas, microtexto, etc., [5], [6] [7]

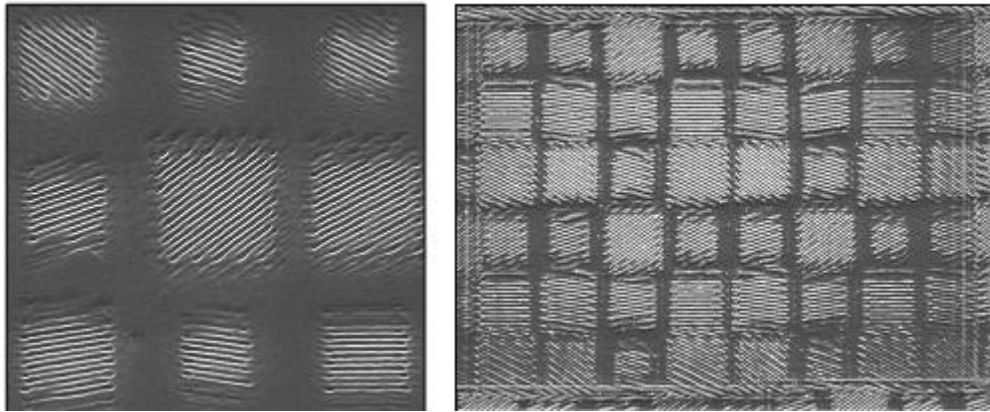
De otro lado se han dado importantes desarrollos en la tecnología de micro repujado [8] que ha permitido la reproducción masiva y económica de los hologramas, favoreciendo su aplicación y consumo.

Los dispositivos DDIOV permiten trabajar en sinergia con dichos desarrollos incrementando el nivel de seguridad de los materiales y disminuyendo la posibilidad de replicación, generando adicionalmente un efecto visual que captura la atención del usuario.

Los DDIOV basados en matriz de puntos son conformados por un arreglo bidimensional de una gran cantidad de micro rejillas de difracción (holopixel) del orden de 10 a 200  $\mu\text{m}$  [2], dependiendo de la calidad y tipo de tecnología usada para su creación [9].

En estos hologramas, cada una de las micro rejillas es registrada individualmente lo que hace posible obtener gran cantidad de efectos visuales variables e imágenes compuestas variando los parámetros de cada una de ellas.

Una vista al microscopio de un holograma de micro rejilla se puede apreciar en la Figura 1, el arreglo de las diferentes rejillas al ser iluminado de la forma prevista generara las imágenes y efectos calculados.



*Figura 1. Vista al microscopio de un arreglo de micro rejillas [10].*

En este trabajo de investigación se propone estudiar diferentes métodos de generación y registro de micro rejillas de difracción para establecer su viabilidad y complejidad técnica.

En la realización de este estudio se deben resolver diferentes problemas:

**Ópticos:**

La generación y creación de las micro rejillas de difracción llamadas Holopixel, controlando sus parámetros, para que produzcan el efecto visual básico deseado, esto es, un color para un observador ubicado a una posición específica.

**Mecánicos:**

Implementación y control de un dispositivo con movimiento en dos ejes, X,Y, que permita el posicionamiento del medio de registro punto a punto donde deben ser ubicadas las micro rejillas generadas y un sistema que permita controlar los tiempos de obturación.

**Matemáticos:**

Desarrollo de algoritmos que permitan calcular los parámetros de las rejillas a partir de imágenes digitales básicas.

Para esto se propusieron los siguientes objetivos:

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General.**

Evaluar la factibilidad de las tecnologías para la generación y registro de hologramas de matriz de puntos asociado con requerimientos relativos a la complejidad de los componentes ópticos, mecánicos, electrónicos; la capacidad de cómputo y elementos de control requeridos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos.**

1. Sintetizar los principales modelos teóricos que sustentan la funcionalidad de las rejillas de difracción, en los que se basan los hologramas de matriz de puntos.
2. Realizar un análisis de las diferentes configuraciones experimentales y principios para la generación de rejillas de difracción y seleccionar la más apropiada para evaluar experimentalmente.
3. Diseñar e implementar algoritmos para la generación de hologramas de matriz de punto (HMP) a partir de imágenes digitales básicas.
4. Implementar un montaje experimental básico que permita realizar las pruebas necesarias para validar el sistema seleccionado.

## 2. Estado del arte

### 2.1 Concepto de seguridad.

El concepto del grado de seguridad involucra tres dimensiones: la seguridad del producto en su empaque, el mensaje y la inspección o validación de dicha seguridad. La seguridad en el producto y su empaque implica principios físicos y de diseño de formas, tales como su complejidad, materiales de construcción, destructibilidad de elementos de marcación, o evidencia de la rotura de la cadena de seguridad.

El mensaje que porta el empaque lo individualiza por su valor estético, su claridad, de manera que lo hagan distinguible de una posible copia. Estos dos elementos finalmente deben ser pensados para que la inspección o detección sean lo más evidente posibles para cualquier posible usuario.

La inspección o validación óptima es la hecha a través de los órganos de los sentidos [11], [12] sin la ayuda de elementos externos, en la que el usuario final podrá reconocer la autenticidad de su producto sólo con el reconocimiento de los elementos de marca únicos o siguiendo instrucciones muy simples, generalmente portadas en el mensaje y de fácil recordación. El requerimiento de ayudas para la autenticación, tales como lámparas especiales, reactivos químicos, microscopios, etc. son considerados elementos de seguridad de segunda línea. Involucran efectos psicológicos durante la validación por parte de la persona que recibe y entrega el producto y crean una barrera para la verificación de primera mano. En general son más confiables, pero para su validación requiere de inspectores calificados.

Los elementos de seguridad pueden clasificarse en tres grandes grupos dependiendo del lugar y el mecanismo que le confiere la seguridad:

1. Elementos incorporados en el sustrato.
2. Elementos diferenciadores por impresión.
3. Elementos de efectos ópticos variables.

Entre los elementos incorporados en el sustrato, se tienen:

- Marca de Agua.
- Color.
- Fibras entremezcladas para lograr randometría.
- Perforaciones.
- Grabados laser.
- Sustratos destructibles.

Entre los elementos diferenciadores de impresión usados en elementos de seguridad se encuentran:

- Líneas Guilloché.
- Microtexto (Figura 2).

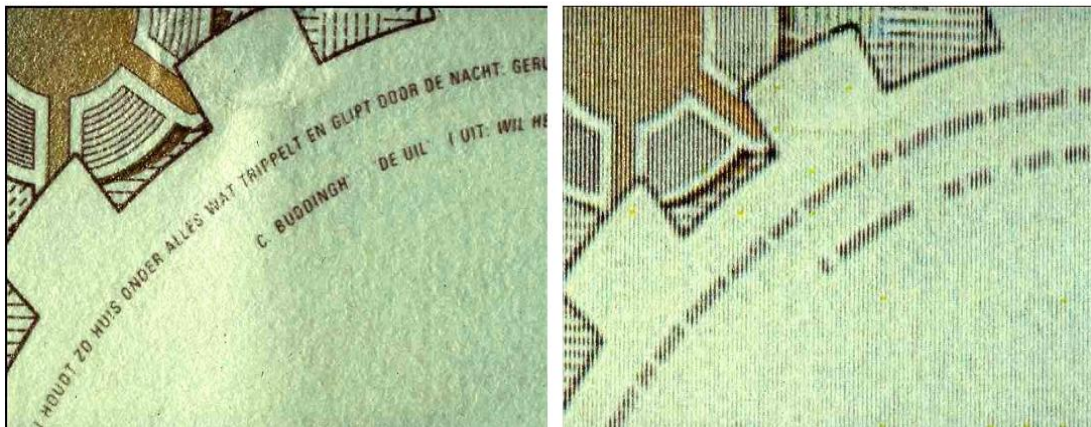


Figura 2. Impresión de microtexto y microlíneas, comparado con una copia realizada en una fotocopidora de alta resolución. [11].

- Vista a través.
- Numeración.
- Diferenciación al tacto o relieves vía Intaglio.
- Imágenes latentes.
- Tintas fluorescentes.
- Tintas termo crómicas.
- Tintas químicamente reactivas.
- Imágenes ocultas.
- Randometría por impresión.

- Textos encriptados por efecto moiré [13], [14], [15] o técnicas de complemento. En la Figura 3 se presenta un ejemplo de una estructura de encriptación por efecto moiré, en ella se pueden apreciar tres zonas, a la derecha una región donde está solamente la estructura de líneas, a la izquierda el texto tal como lo percibe el usuario y en la zona del medio el texto revelado al sobreponer las estructuras (ARSEC ARCLAD ARSEC).

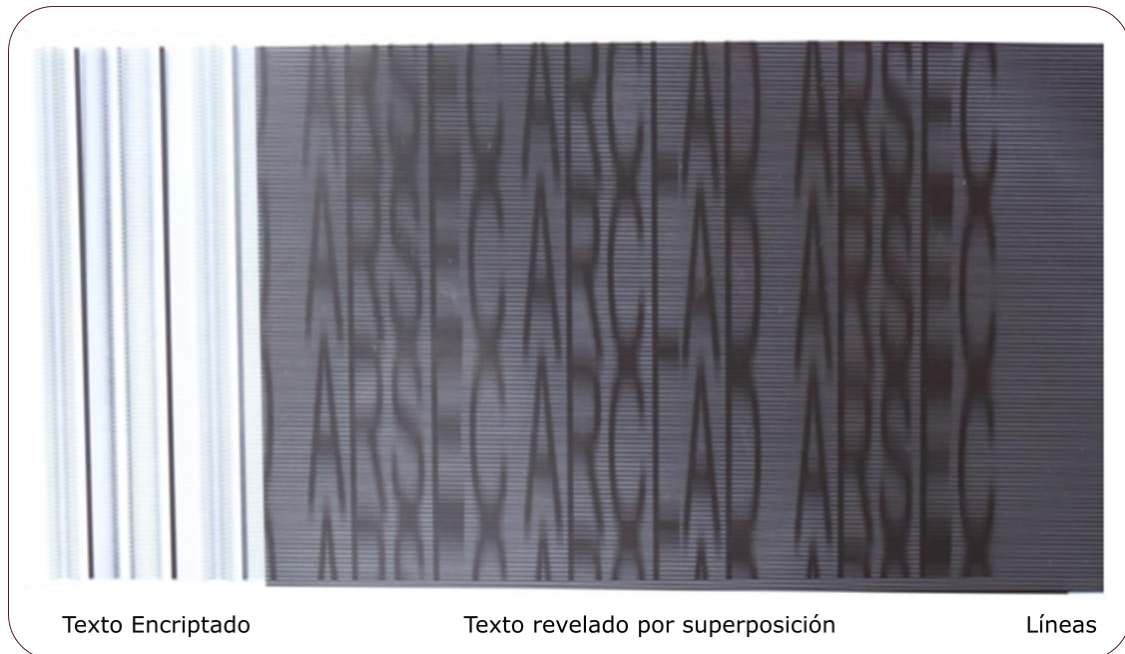


Figura 3. Textos encriptados utilizando principios moiré.

Finalmente, están los elementos ópticos variables (OVD), los cuales no son susceptibles de copiar por medios fotográficos convencionales, fotocopiadoras o escáner y ningún medio de impresión ya sea digital o análogo, dado el comportamiento que presenta la luz al iluminarlos [16], [1]. Estos elementos por lo general requieren tecnologías no convencionales para su fabricación y en general son fácilmente observables a simple vista. Estas características los hacen óptimos para las aplicaciones de seguridad (de primera línea) y garantía de la autenticidad de los productos [16].

Dependiendo de los principios ópticos en los que se basan se clasifican en dos categorías:

- Elementos de seguridad por interferencia (ISIS).
- Los dispositivos difractivos de imagen ópticamente variables (DDIOV).

### **2.1.1 Elementos de seguridad por interferencia (ISIS)**

Contrario al principio constructivo de los DDIOV, que son conjuntos de franjas de interferencia, los ISIS son contruidos mediante la superposición de películas muy delgadas que logran descomponer por interferencia la luz dando efectos iridiscentes imposibles de replicar por medios convencionales digitales. Estos se dividen en dos grupos:

#### **Estructuras de una capa:**

Estas estructuras son hechas con películas muy delgadas de elementos con muy alto índice de refracción, presentando algunos cambios de color con el cambio del ángulo de observación, además de tener alto nivel de reflexión, tal como las tintas de acabado perlado compuestas de hojuelas de dióxido de Titanio  $\text{TiO}_2$  con índice de refracción  $n \cong 2.7$  con formas especiales e índices de reflexión del 30% de la luz visible, al ser aplicado las hojuelas se orientan generando interferencias que confieren un efecto perlado [16].

#### **Estructuras de capas múltiples:**

Estas estructuras consisten en la aplicación de capas muy bajas de recubrimientos con elementos de índices de refracción muy diferentes. Ej.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $n = 1.76$ ),  $\text{ZrO}_2$  ( $n = 2,2$ ),  $\text{SiO}_2$  ( $n = 1.54$ ),  $\text{TiO}_2$  ( $n = 2.7$ )  $\text{MgF}_2$  ( $n = 1.38$ ), dando como resultado cambios entre elementos altamente reflectivos a elementos con reflexión difusa con cambios del ángulo de iluminación o de visión [16] siendo así elementos ópticos variables.

### **2.1.2 Dispositivos difractivos de imagen ópticamente variables (DDIOV).**

Basados en estructuras formadas por redes que difractan la luz en diferentes órdenes, normalmente el orden cero y el primer orden de difracción son utilizados en la generación de elementos de seguridad.

#### **2.1.2.1 Elementos de orden cero (ZOD).**

Los elementos de orden cero presentan una reflexión especular que varía dependiendo el ángulo de incidencia de la luz, están fabricados por redes de difracción con elementos de distinto índice de refracción, periodos menores que la longitud de onda de la luz visible, con frecuencias de línea mayor a 2500 l/mm ( $>63000$  lpi). La Figura 4 muestra un esquema constructivo de los elementos. En la fabricación de estas estructuras intervienen procesos de embossing, deposición de elementos y recubrimiento, para lograr un sistema tridimensional

que contiene en su interior redes de dos materiales que le imparten el comportamiento óptico [17].

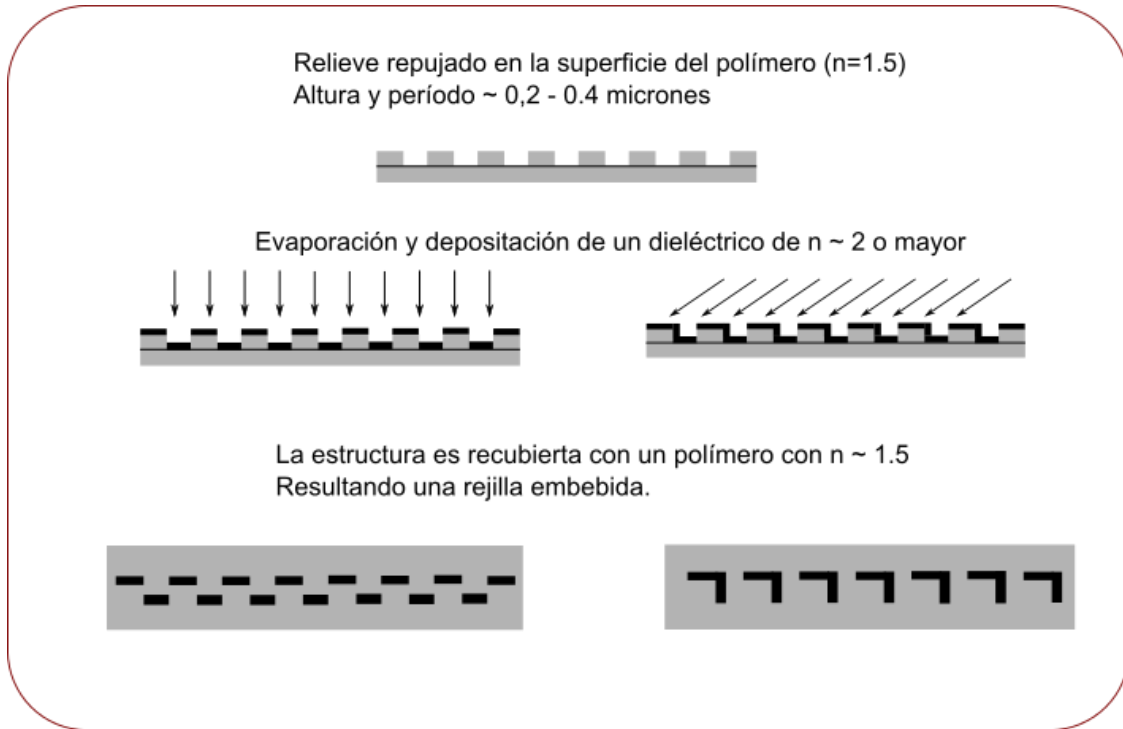


Figura 4. Principio de fabricación de estructuras basadas en el orden cero [17]

#### 2.1.2.2 Elementos de primer orden (FOD).

Bajo los elementos de primer orden están comprendidas todas las estructuras conocidas como hologramas, los cuales pueden ser generados por:

- **Elementos difractivos Holográficos (HOD):**

Se generan redes de difracción totales mediante la interferencia de haces de luz láser (haz objeto y haz referencia). Se parte de objetos reales teniendo la posibilidad de generar imágenes holográficas 3D, que bajo la técnica de arcoíris (rainbow) permite reconstruir la imagen del objeto al iluminar el holograma con luz blanca o natural. También se pueden generar estructuras 2D/3D, las cuales reproducen varias imágenes 2D en distintos planos situados a distinta profundidad creando un efecto de volumen. Es posible también crear estereogramas, los cuales son imágenes de un objeto observado desde distintos puntos de vista a través de ranuras, creándole una sensación al observador, de estar viendo un objeto en 3D o incluso

elementos en movimiento al cambiar el punto de iluminación o el punto de visión. [18], [19] [20] [21].

- **Matriz de puntos:**

Mediante un software gráfico especializado, se calcula una serie de puntos (holopixeles), los cuales corresponden a pequeñas redes de difracción dependiendo de la imagen deseada. Dichas redes se generan por la interacción de dos láseres interfiriendo sobre una placa fotográfica de alta resolución a diferentes ángulos de incidencia y rotación, variando de esta manera la orientación y periodo de los patrones de interferencia [6]. Al iluminar el holograma, este reproduce efectos de colores y volumen en la imagen de acuerdo a lo calculado por el software. Bajo esta técnica se logran múltiples efectos, además de elementos adicionales de seguridad, tales como hologramas tipo flip-flop con varios canales de observación, micro texto, textos ocultos, micro estructuras, efectos de movimiento, etc. usando las altísimas resoluciones a las que pueden llegar estos equipos, dando adicionalmente la posibilidad de combinar estas técnicas creando elementos que resultan con una altísima complejidad de replicación [22].

En general es posible clasificar los elementos ópticos relacionando su grado de seguridad con la dificultad de replicación [23], la cual va en relación directa con la resolución u orden de magnitud del tamaño del punto. La Figura 5 relaciona algunos principios de seguridad tanto variables como invariables ópticamente organizados según su resolución y su grado de seguridad.

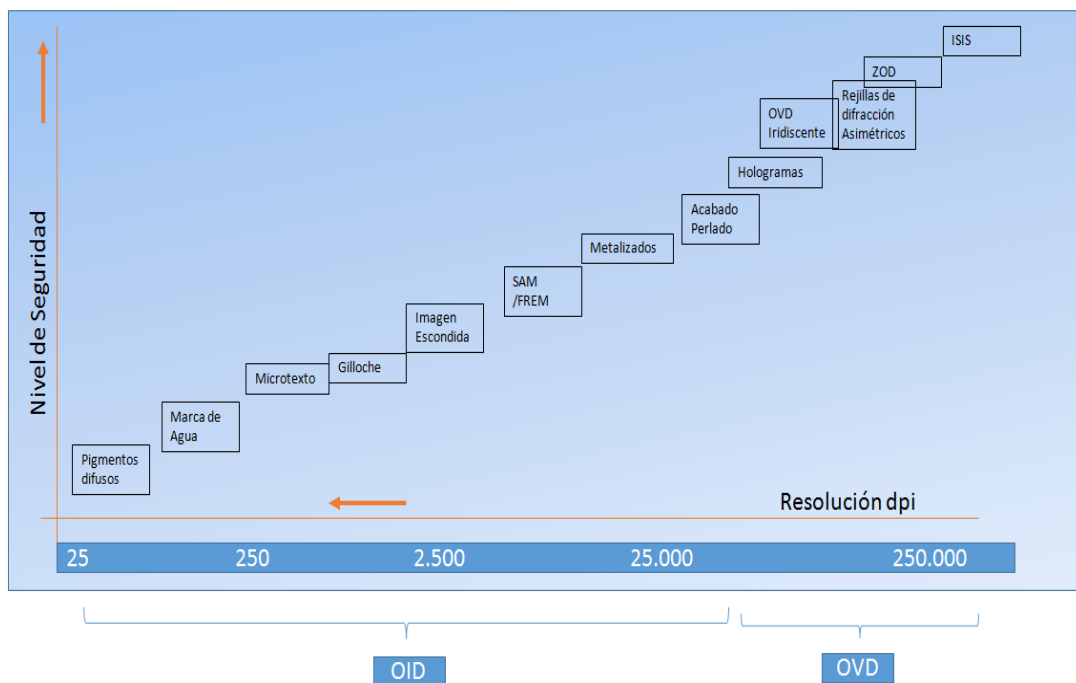


Figura 5. Relación del nivel de seguridad con la resolución de la impresión. [11].

En la Figura 5 se aprecia que los hologramas de matriz de punto, en la medida que se logran altas resoluciones y los diseñadores gráficos presentan propuestas muy originales y personalizadas, de difícil replicación se ubican en una región de alto nivel de seguridad, que añadido a los costos de fabricación más bajos relativos a otras técnicas de incluso menor nivel de seguridad que los convierten en una alternativa de excelente costo / beneficio añadido a un gran impacto visual.

## 2.2 Proceso de fabricación de hologramas de matriz de puntos por repujado (embossing)

Un holograma embossed o repujado, consiste en una superficie en relieve grabada sobre un material plástico transparente o metalizado [8], que contiene las franjas de interferencia, comportándose como un holograma de transmisión. Las etapas requeridas para su manufactura se describen a continuación.

### 2.2.1 Registro

El proceso de fabricación arranca con la producción de un registro llamado máster, el cual es el holograma propiamente dicho (Figura 6). Este puede obtenerse por medios ópticos clásicos en

una mesa óptica, aislada de vibraciones, lentes, espejos, láser, etc. Usando un objeto real 3D o varias imágenes reales 2D.

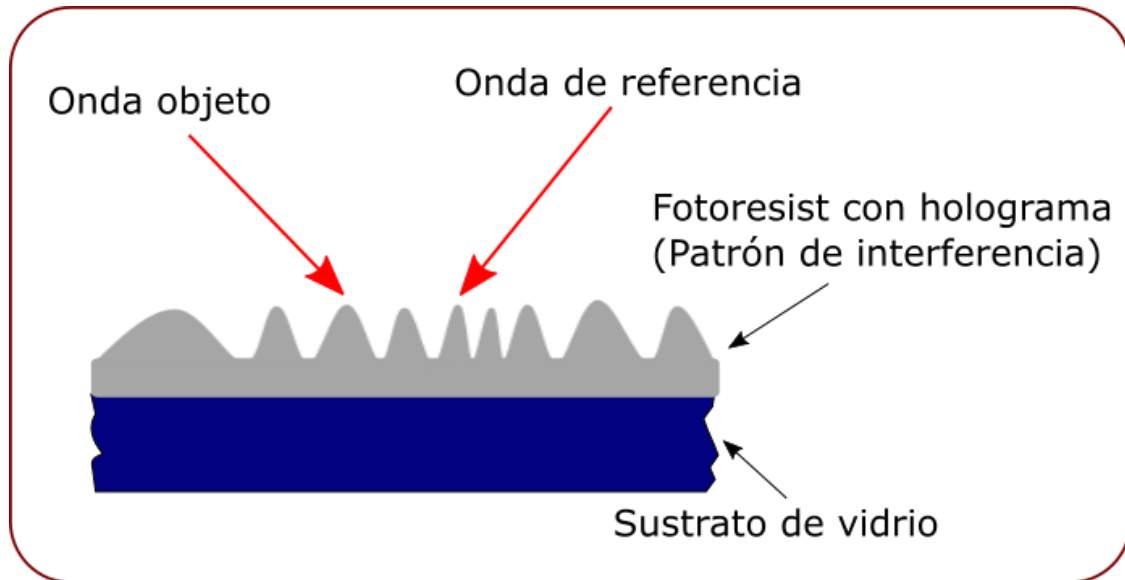
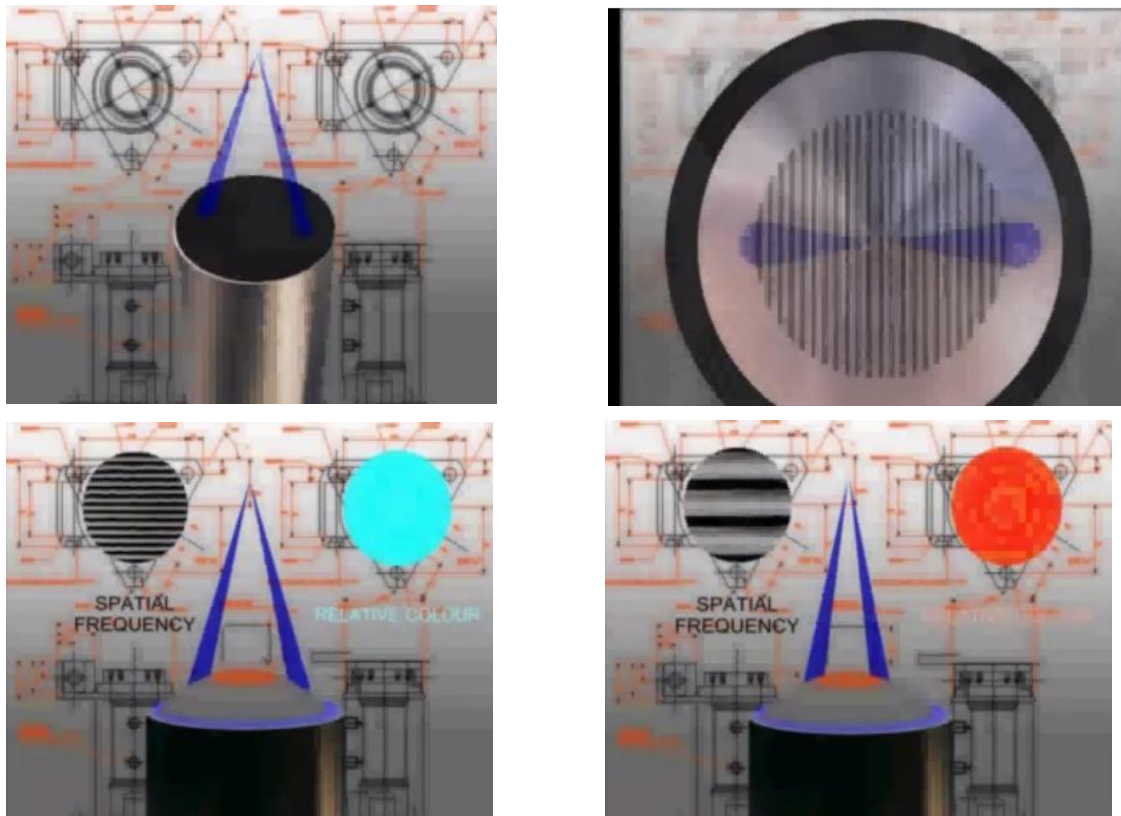


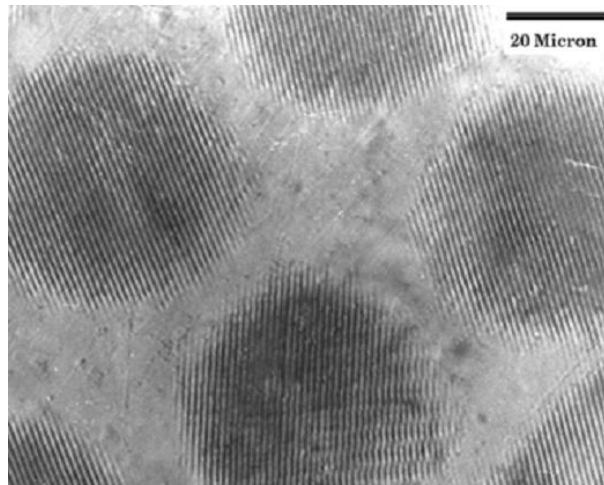
Figura 6. Producción del máster en la placa fotosensible (fotore Resist) [8].

En la tecnología de matriz de puntos, se graban las pequeñas rejillas de difracción (holopixel) punto a punto sobre un elemento de registro fotosensible como el “fotore Resist” en un equipo con movimientos controlados desde un computador, variando el ángulo relativo de los dos haces y el ángulo de incidencia sobre la placa se pueden cambiar la orientación y la frecuencia de las líneas de interferencia, tal como se aprecia en la Figura 7. En la Figura 8 se puede observar una imagen al microscopio de un arreglo de holopixeles registrados por este método.



*Figura 7. Imagen de sistema de registro de matriz de puntos, variando el ángulo de incidencia y el ángulo entre los dos haces de luz se generan redes de difracción con diferente orientación y frecuencia de las líneas de interferencia [24].*

Técnicas más avanzadas realizan el proceso con un haz de electrones (E beam) el cual registra la información del holograma punto a punto logrando grandes resoluciones. Estos equipos son altamente sofisticados y son utilizados en aplicaciones de la más alta seguridad. Por los costos de los equipos existen sólo algunas empresas especializadas en la fabricación del máster [25].



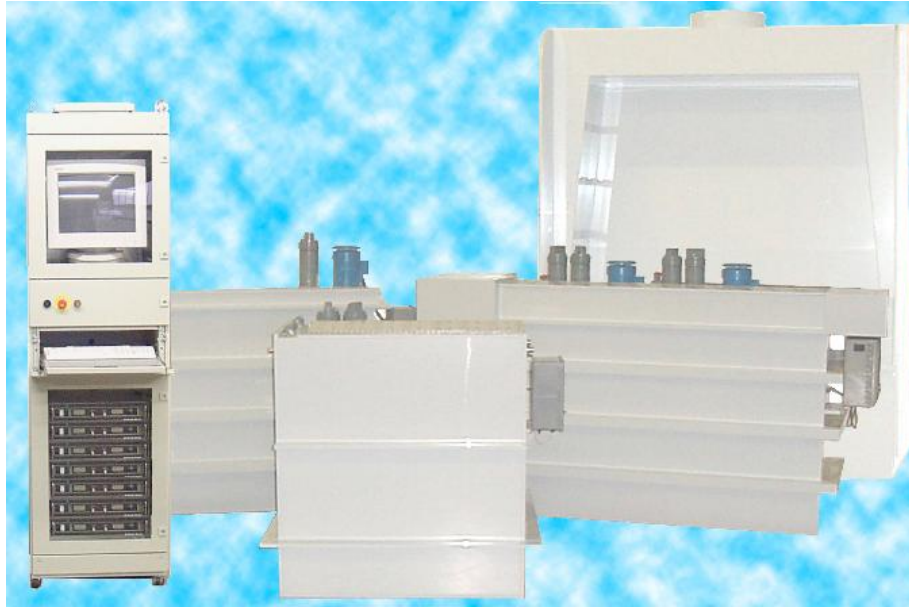
*Figura 8. Imagen de los holopixeles conteniendo redes de difracción grabados por el método de matriz de puntos [5].*

### **2.2.2 Plateado**

En el registro de los holopixeles sobre el “fotore sist”, las franjas de interferencia se forman en relieve, lo cual permite que luego pueda ser recubierto con una fina capa de plata; con el objeto de calcar el relieve de las rejillas y obtener de esta forma una imagen del patrón de interferencia en un medio metálico más resistente y flexible.

### **2.2.3 Electroformado**

La película de plata es luego desmoldada del fotore sist y recubierta por procesos electroquímicos con níquel, formando unas láminas metálicas que contienen el relieve con la información sobre el objeto, dichas láminas tienen un mayor calibre y mucha mayor resistencia. En la Figura 9 se muestra un equipo de recubrimiento electro químico usado para electro formar las láminas.



*Figura 9. Imagen de equipo de electroformado para fabricación shim (láminas metálicas con los relieves correspondientes al registro holográfico) [25].*

#### **2.2.4 Recombinación**

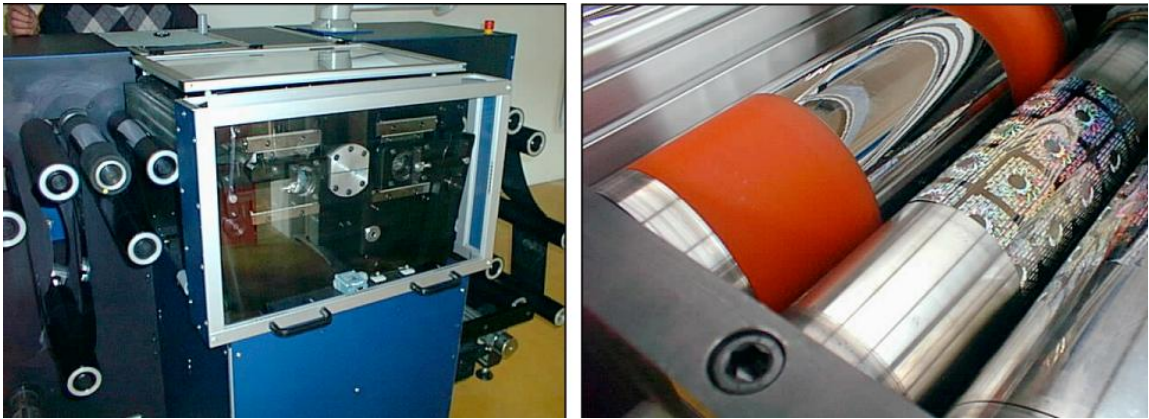
Las láminas metálicas de un holograma son “estampadas” en una matriz plástica con la ayuda de una prensa hidráulica (Figura 10) con control de presión y temperatura, creando el diseño completo con las repeticiones a grabar sobre el material, un especial cuidado es requerido para que los empates o sellos sean visibles y se logre una imagen continua.



*Figura 10. Imagen de prensa para fabricación completa del arte por combinación de shims o láminas con holograma. [25].*

### **2.2.5 Estampado**

Finalmente, la placa con el diseño completo es montado en una máquina “repujadora” continua (rollo a rollo), como la mostrada en las Figura 10 y Figura 11, la cual contiene una serie de rodillos cromados de muy buen acabado y control de posición, en uno de ellos son montadas las matrices del holograma y por medio de procesos de temperatura y presión es estampado el relieve de difracción sobre una película plástica de Polipropileno (PP) o Poliéster (PET), transparente o metalizado para permitir la reconstrucción del holograma por transmisión y formar una etiqueta (Figura 12).



*Figura 11. Imagen del elemento que transfiere por presión y temperatura el holograma a la película plástica. [25]*



*Figura 12. Imagen de un holograma de seguridad constituido por varios elementos. [19]*

### **2.3 Tecnología de generación hologramas de punto**

Los sistemas para generar hologramas de punto están compuestos por tres bloques funcionales: Software, Hardware de posicionamiento y control y óptica, como se esquematiza en la Figura 13.

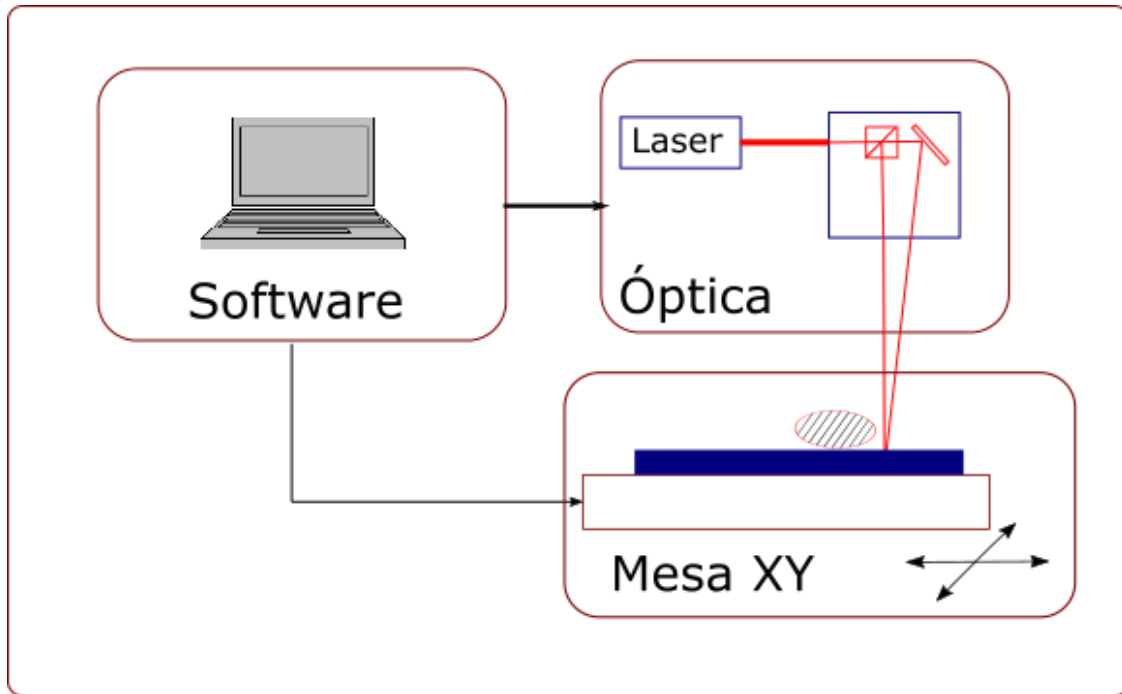


Figura 13. Diagrama funcional de un sistema de generación de hologramas de punto

El software debe realizar funciones de cálculo de los parámetros de la rejilla de acuerdo a su posición, ubicación deseada del observador, color e intensidad, partiendo de la imagen y los efectos ópticos deseados. Debe además realizar la función de control de posición XY del elemento de grabación, tiempo y duración de la exposición.

El hardware del sistema consta de una mesa XY que debe recorrer todo el espacio del elemento óptico a grabar, montado en una mesa amortiguada para contrarrestar las vibraciones, además de un sistema de obturación del haz principal de grabación.

La óptica, el corazón propiamente dicho del sistema de generación de las rejillas de difracción ha tenido cambios con la evolución de los sistemas electrónicos y la digitalización de los elementos. Los primeros sistemas comerciales (Light Machine, Sparkle I,II) [26], [1] se basan en un haz principal, el cual se divide y mediante diversos mecanismos (Hardware) se desplazan los elementos ópticos, los cuales pueden ser espejos, divisores de haz, etc. [27], para lograr diferentes ángulos de incidencia de los haces y de esta forma variar el periodo de las rejillas. En estos sistemas toda la óptica principal debe girar de manera controlada (software) para lograr la orientación deseada; en algunos sistemas es posible variar el tamaño del punto variando el tamaño del haz y su convergencia (Figura 14).

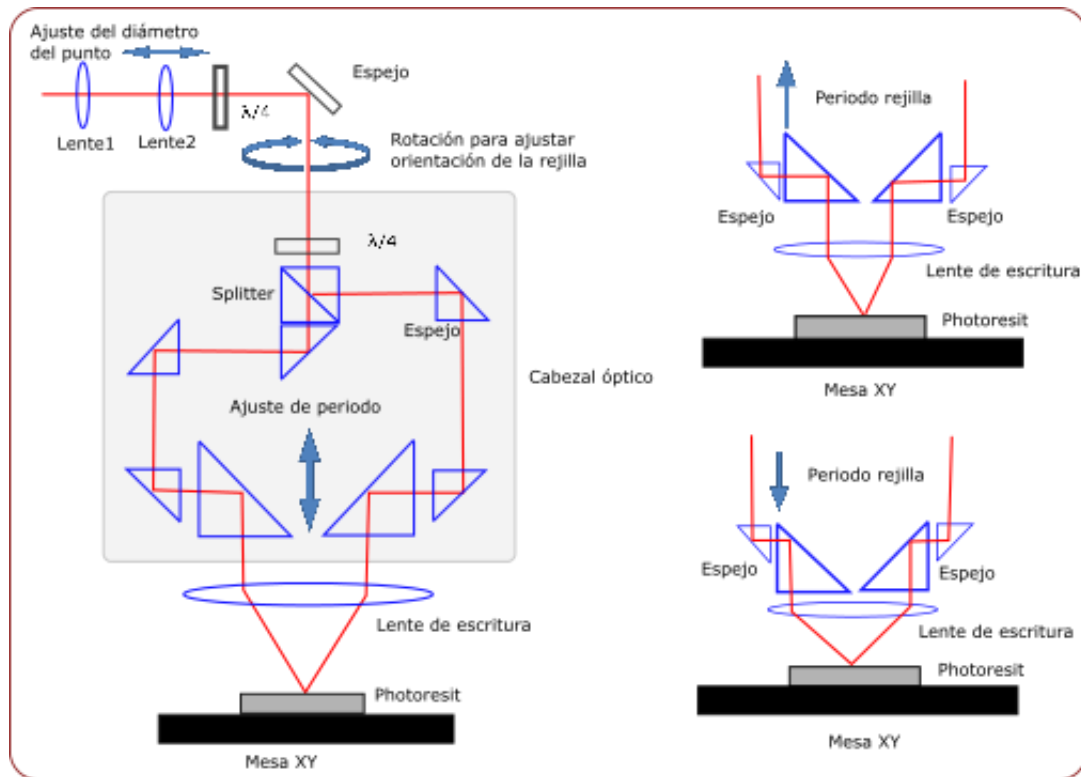


Figura 14. Esquema de la configuración óptica del sistema Sparkle. Los principales parámetros de las rejillas, periodo, orientación y tamaño pueden ser controlados con variación de la posición de los elementos ópticos.

En los sistemas de generación más recientes [28], [29], [30], [31], [32], [21], [33] y [34] la óptica análoga y clásica, usada para generar las diversas configuraciones de las rejillas, es sustituida por un modulador espacial de luz (SLM), el cual proyecta patrones ya sea para generar haces que luego interfieren en la superficie de registro o imágenes directas para ser registradas. Elimina de esta forma los desplazamientos espaciales, disminuyendo significativamente los tiempos de registro y la complejidad mecánica del sistema; ampliando de esta manera las posibilidades de generación de elementos de seguridad (permitiendo mayor resolución, incrementar cantidad de puntos y efectos ópticos). Lo cual ha sido favorecido por la mayor capacidad y velocidad de cómputo que se tiene disponible día a día, además de nuevos elementos mecánicos de mayor precisión y velocidad de respuesta [35].

En la Figura 15 se ilustra esquemáticamente el sistema de HoloMax [23] basado en un modulador espacial (SLM).

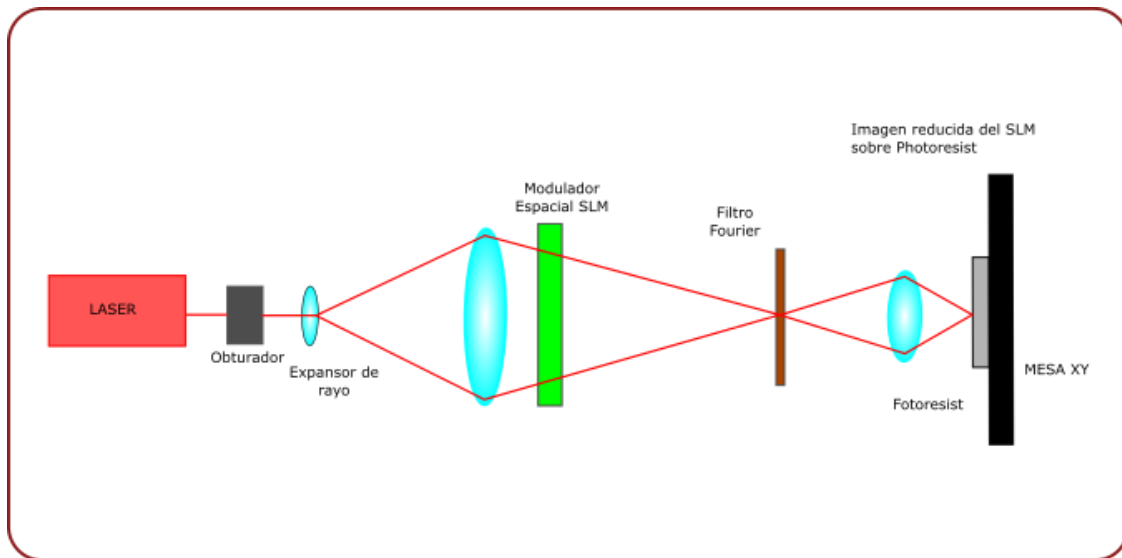


Figura 15. Esquema óptico basado en un SLM para generar rejillas de difracción de Holomax [23].

## 3. Fundamentos Físicos de la Holografía de Puntos

### 3.1 Cálculo de micro redes difractivas

El objetivo del diseño de un holograma de matriz de puntos, una vez definido un efecto visual deseado y la posición del observador, es calcular los parámetros de un arreglo bidimensional de micro rejillas, cada una de las cuales difractará una longitud de onda en un ángulo específico según su orientación y su separación.

Una vez registrado el holograma y ser iluminado para su reconstrucción, debe difractar la luz de manera tal, que la suma de los efectos de todas las micro rejillas del holograma percibida por el observador corresponda a la imagen deseada.

La teoría general para la generación de las micro rejillas y sus efectos al momento de la reconstrucción, ha sido estudiada por varios autores, quienes basados en la teoría de difracción han propuesto varios modelos y algunas simplificaciones que ayudan en los algoritmos de cálculo. Li Yaotong [36] desarrolló un modelo generalizado para el cálculo de las micro rejillas basado en los vectores de propagación de la onda. Otros autores como Bulanovs, [37], [4], Chih- Kung [38] y Tamulevicius [2], [39] han utilizado su modelo y algunas variaciones, realizando algunas simplificaciones para dar velocidad de cálculo a los dispositivos de registro. Partiendo de estos trabajos, a continuación, se presenta el modelo matemático que se desarrolla en este trabajo para el cálculo de los parámetros de las rejillas de acuerdo a la imagen deseada.

### 3.1.1 Generación de Franjas de interferencia

Para un haz de luz de forma general, representado por el vector de propagación  $\vec{K}$ , como el mostrado en la Figura 16, su amplitud compleja se representa por [8], [40] [41] [42].

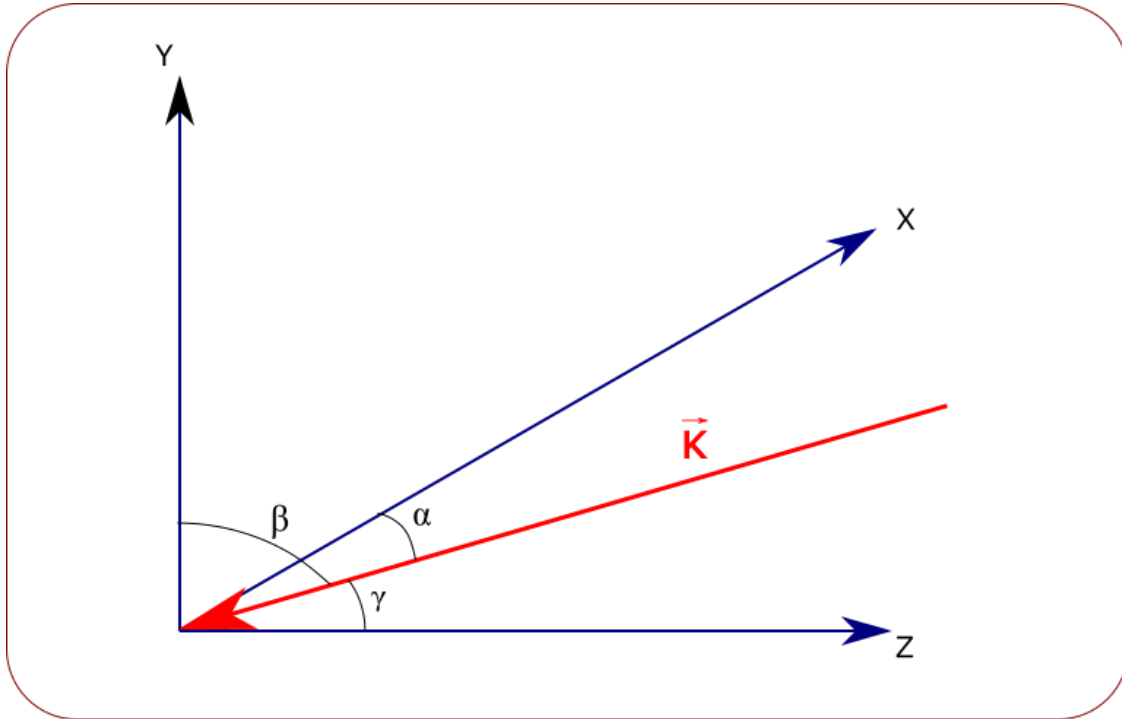


Figura 16. Haz de luz plano  $K$  de longitud de onda  $\lambda$ , amplitud  $A$  y ángulos  $\alpha, \beta, \gamma$  con respecto a los ejes  $X, Y, Z$

$$A(\vec{r}) = A_0 e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{K} \cdot \vec{r})} \quad 1.$$

Vectorialmente la dirección de dicho rayo está dada por el vector de propagación  $\vec{K}$  :

$$\vec{K} = x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k} \quad 2.$$

El vector de dirección de dicho rayo está dado por:

$$\vec{r} = \cos \alpha \vec{i} + \cos \beta \vec{j} + \cos \gamma \vec{k} \quad 3.$$

Siendo  $\alpha, \beta, \gamma$  los ángulos con respecto a los ejes  $x, y, z$ , respectivamente.

El producto punto del vector que representa el rayo y su vector dirección está dado por:

$$\vec{K} \cdot \vec{r} = x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma \quad 4.$$

El producto punto  $\vec{K}_i \cdot \vec{r}$  de los dos rayos coplanares como los mostrados en la Figura 17 y la Figura 19 que interfieren en un punto, son representados en forma general por:

$$\vec{K}_1 \cdot \vec{r}_1 = x \cos \alpha_1 + y \cos \beta_1 \quad 5.$$

$$\vec{K}_2 \cdot \vec{r}_2 = x \cos \alpha_2 + y \cos \beta_2 \quad 6.$$

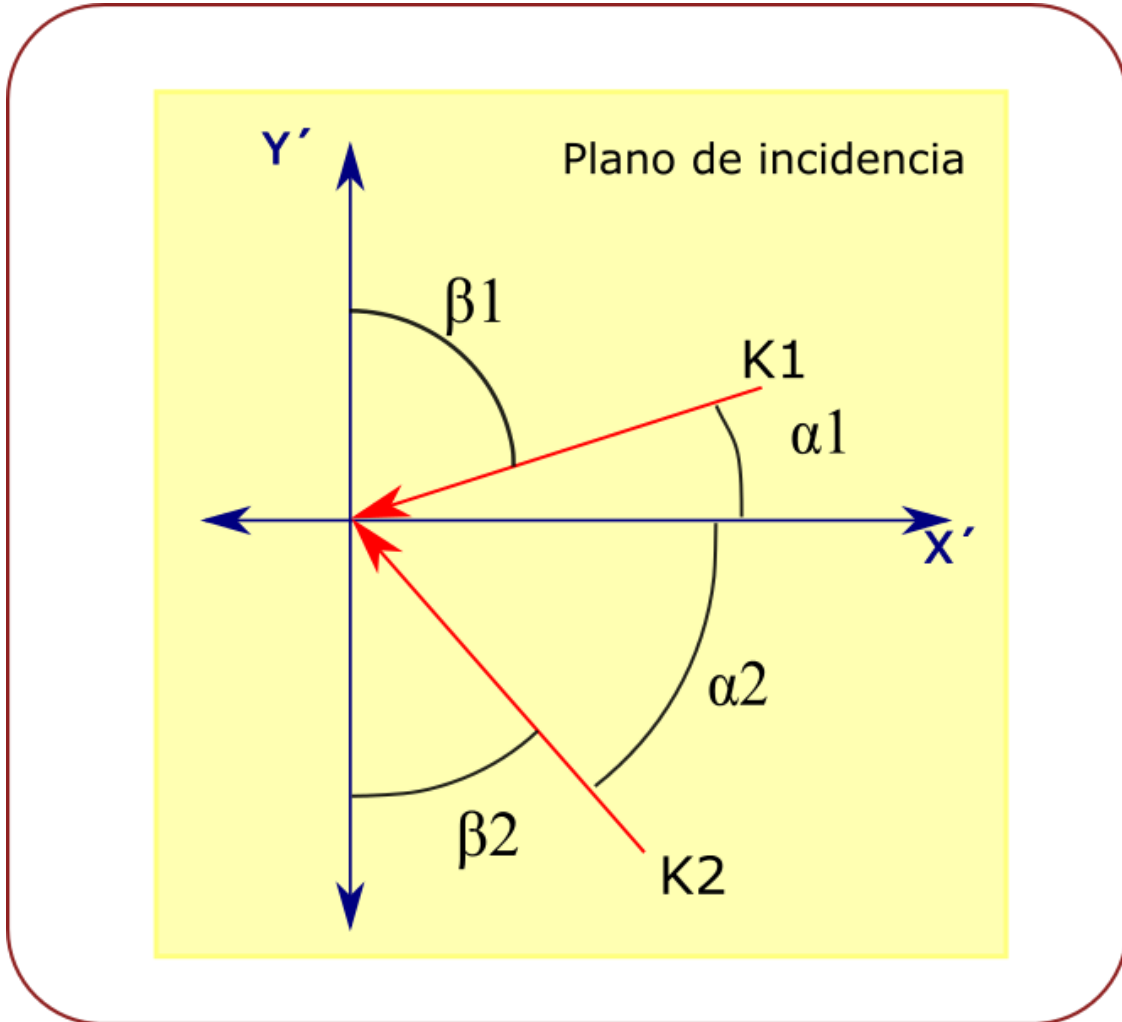


Figura 17. Dos haces de luz planos propagándose sobre un plano de incidencia e interfiriendo en un punto.

Por lo que en forma general los haces de luz en el plano XY pueden expresarse como:

$$A_i(x,y) = A_{i0} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (x \cos \alpha_i + y \cos \beta_i)} \quad i=1,2 \quad 7.$$

La superposición de estos dos haces de luz produce una interferencia cuya intensidad es:

$$I(x,y) = |A_1(x,y)|^2 + |A_2(x,y)|^2 + A_1(x,y)A_2(x,y)^* + A_1(x,y)^*A_2(x,y) \quad 8.$$

Reemplazando para cada haz de luz se tiene:

$$I(x,y) = I_1 + I_2 + A_{10} e^{j\frac{2}{\lambda}(x \cos\alpha_1 + y \cos\beta_1)} A_{20} e^{-j\frac{2}{\lambda}(x \cos\alpha_2 + y \cos\beta_2)} + A_{10} e^{-j\frac{2}{\lambda}(x \cos\alpha_1 + y \cos\beta_1)} A_{20} e^{j\frac{2}{\lambda}(x \cos\alpha_2 + y \cos\beta_2)} \quad 9.$$

Sabiendo que:

$$e^{j(a-b)} + e^{-j(a-b)} = 2 \cos(a - b) \quad 10.$$

Resulta:

$$I(x,y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \cos\left\{\frac{2}{\lambda}[x(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) + y(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)]\right\}$$

Que puede ser expresada por:

$$I(x,y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \cos(2(F_x x + F_y y)) \quad 11.$$

Donde  $F_x$  y  $F_y$  están dados por:

$$F_x = \frac{(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)}{\lambda} = 1/d_x \quad 12.$$

$$F_y = \frac{(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)}{\lambda} = 1/d_y \quad 13.$$

Los cuales representan las componentes x y y del periodo espacial del patrón de franjas formadas al interferir los dos haces.

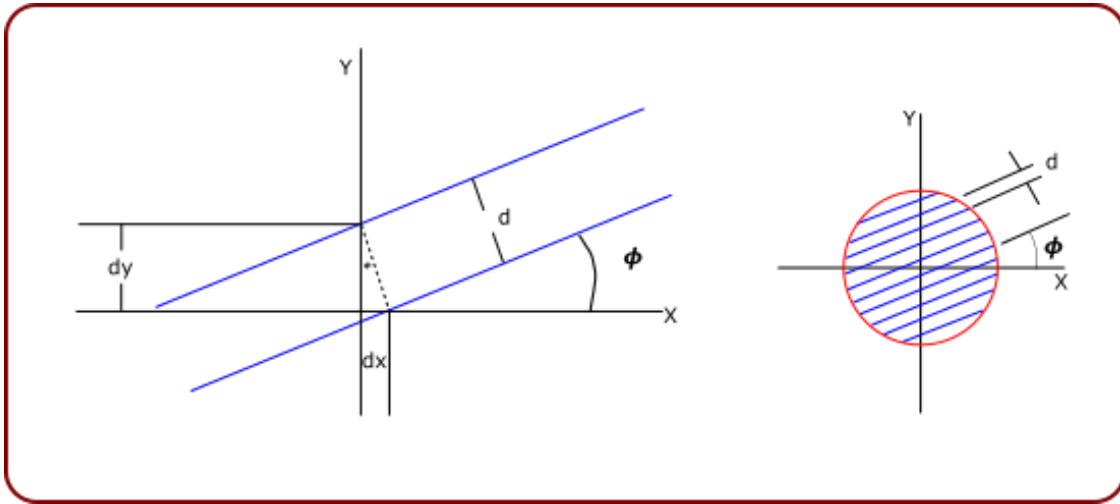


Figura 18. Componentes  $d_x$  y  $d_y$  de la separación  $d$  en los ejes  $x$ ,  $y$ .

De esta forma la separación entre franjas o periodo espacial estará dada por el inverso de la frecuencia,  $d=1/F$

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad 14.$$

con  $d_x = d \sin \phi$  y  $d_y = d \cos \phi$ , siendo  $d_x$  y  $d_y$  las separaciones en  $x$  y en  $y$  de las franjas a los ejes  $x$  y  $y$ . mostradas en la Figura 18.

Cumpléndose, además:

$$\tan \phi = d_x / d_y = F_y / F_x \quad 15.$$

Para el patrón de interferencia correspondiente a la rejilla de difracción mostrada en la Figura 18, el ángulo  $\phi$  en las franjas se registra con un plano de incidencia tiene una rotación  $\phi-90^\circ$  con respecto a los ejes principales de la placa de registro siendo normal al patrón de franjas, como la mostrada en la Figura 19.

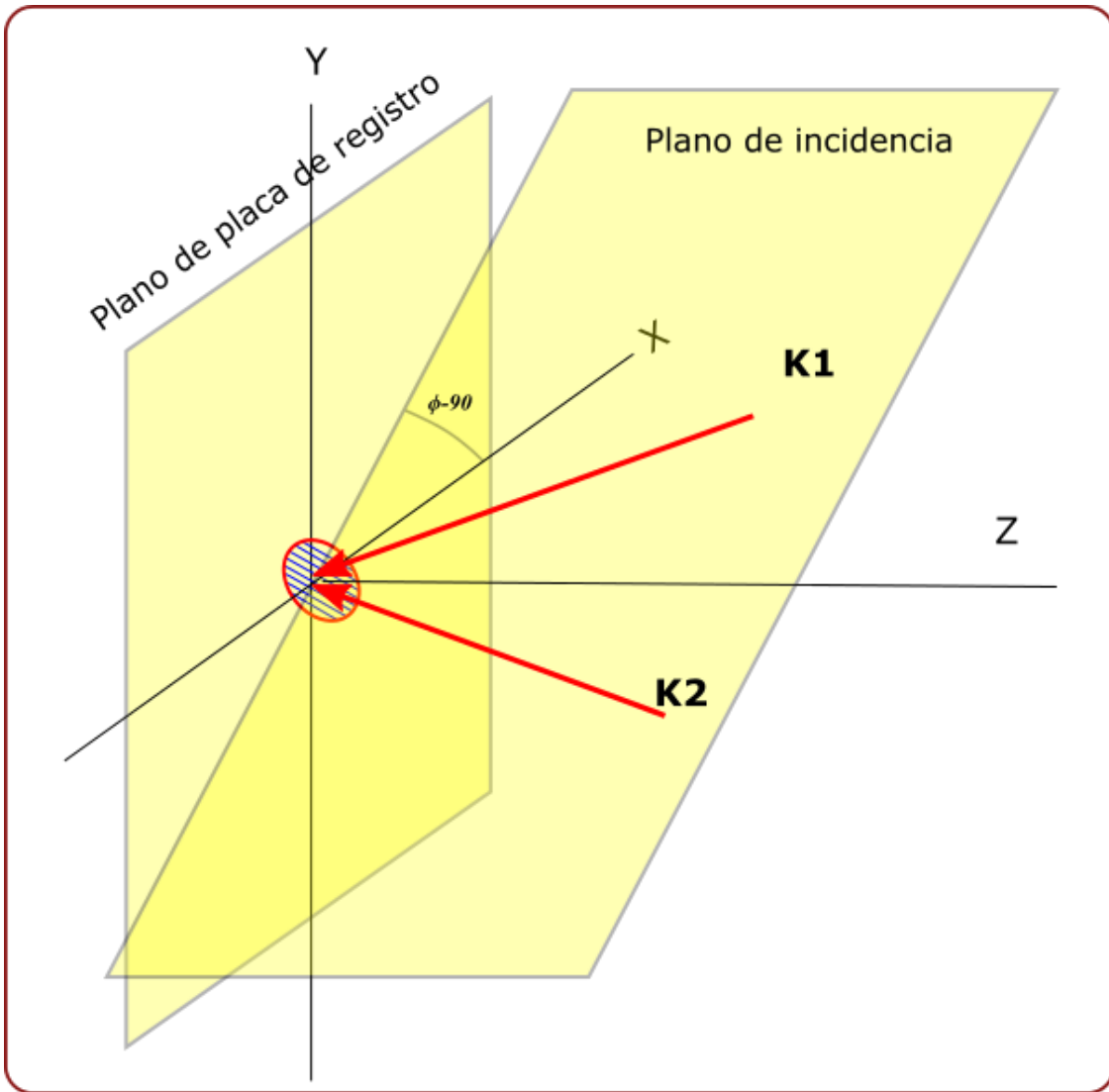


Figura 19. Formación de la rejilla de difracción cuando el plano de incidencia de los haces K1 y K2 presenta una rotación  $\Phi$

Un caso especial cuando dos haces simétricos interfieren con un ángulo  $\alpha_1$  con respecto al eje x como los mostrados en la Figura 20, se tiene reemplazando en (12) y (13):

$$F_x = \frac{(\cos\alpha_1 - \cos(-\alpha_1))}{\lambda} = 0 \quad 16.$$

$$F_y = \frac{(\cos\beta_1 - \cos(180-\beta_1))}{\lambda} = 2 \frac{(\cos\beta_1)}{\lambda} \quad 17.$$

Siendo de esta manera  $F = F_y$ , resultando:

$$d = 1/F = \frac{\lambda}{2\cos\beta_1} = \frac{\lambda}{2\sin\alpha_1} \quad 18.$$

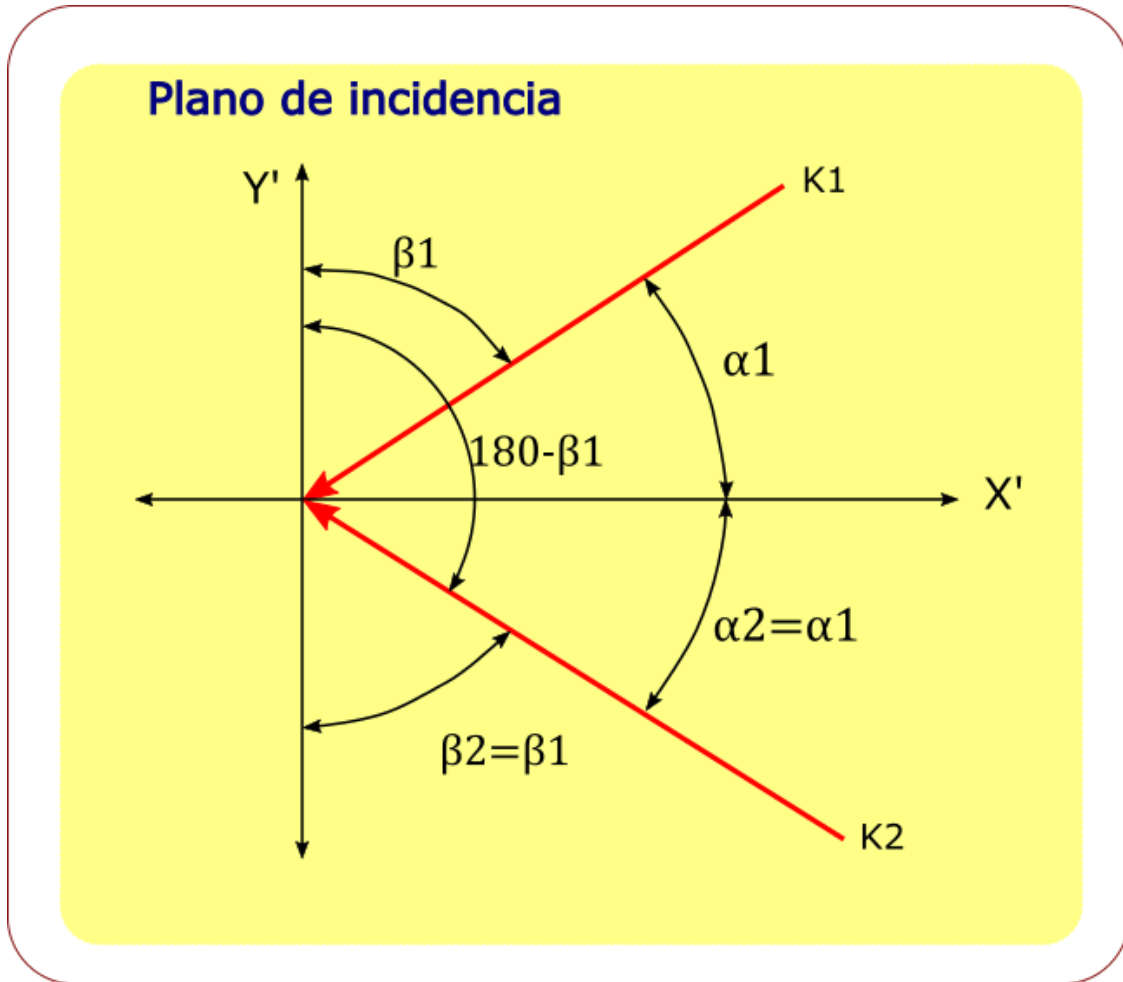


Figura 20. Caso especial de dos haces  $K_1 K_2$  con ángulo de incidencia simétrico

### 3.1.2 Registro de patrón de interferencia.

Al exponer la placa fotosensible a los haces que interfieren, genera un patrón de franjas de interferencia, resultando una variación en su transmitancia como consecuencia de un cambio de altura  $\Delta(x, y)$ . Esta variación está dada por [36]:

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 + K_f I(x, y) \quad 19.$$

Donde:

$\Delta_0$ , es el espesor base de la placa.

$K_f$  es un parámetro determinado por el material fotográfico usado para el registro.

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 + K_f(I_1 + I_2 + \sqrt{I_1}\sqrt{I_2}e^{-j(a-b)} + \sqrt{I_1}\sqrt{I_2}e^{j(a-b)}) \quad 20.$$

Haciendo un cambio de variables con:

$$a = (x \cos \alpha_1 + y \cos \beta_1) \frac{2}{\lambda} \quad 21.$$

$$b = (x \cos \alpha_2 + y \cos \beta_2) \frac{2}{\lambda} \quad 22.$$

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 + K_f(I_1 + I_2) + K_f\sqrt{I_1 I_2}(e^{-j(a-b)} + e^{j(a-b)}) = \quad 23.$$

$$D_0 + D \cos 2(F_x x + F_y y)$$

Donde  $D_0 = \Delta_0 + K_f(I_1 + I_2)$  y  $D = K_f\sqrt{I_1 I_2}$ .

El cual es un registro del patrón variable de interferencia sobre el fotoresist.

### 3.1.3 Reconstrucción.

Al iluminar la rejilla con un haz de luz  $A_3 = A_{30} e^{j\frac{2}{\lambda_i}(\vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3)}$ , donde:

$\lambda_i$  = Longitud de onda de iluminación.

En el plano de registro de la rejilla  $z=0$ , la amplitud compleja del haz es

$$A_3(x, y) = A_{30} e^{j\frac{2}{\lambda}(x \cos \alpha_3 + y \cos \beta_3)} = A_{30} e^{-jc} \quad 24.$$

Donde:

$$c = \frac{2}{\lambda_i}(x \cos \alpha_3 + y \cos \beta_3) \quad 25.$$

La intensidad de la luz resultante difractada por la rejilla está dada por

$$A_R = A_3(x, y) \Delta(x, y) \quad 26.$$

$$A_R = A_3 e^{-jc} * \{\Delta_0 + K_f(I_1 + I_2) + K_f\sqrt{I_1 I_2}(e^{-j(a-b)} + e^{j(a-b)})\} \quad 27.$$

De esta ecuación puede verse que el haz difractado está compuesto de tres términos así:

$$A_3 e^{-jc} * \{\Delta 0 + K_f(I_1 + I_2)\} \quad \text{Término } J_0$$

$$A_3 e^{-jc} * \{K_f \sqrt{I_1 I_2} e^{-j(a-b)}\} = A_3 K_f \sqrt{I_1 I_2} \{e^{-j(a-b+c)}\} \quad \text{Término } J_{+1}$$

$$A_3 e^{-jc} * \{K_f \sqrt{I_1 I_2} e^{j(a-b)}\} = A_3 K_f \sqrt{I_1 I_2} \{e^{-j(c-a+b)}\} \quad \text{Término } J_{-1}$$

$$a-b+c = 2 / \lambda [x \cos \alpha_1 + y \cos \beta_1 - x \cos \alpha_2 - y \cos \beta_2] + 2 / \lambda_i (x \cos \alpha_3 + y \cos \beta_3)$$

$$= 2 [x [(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) / \lambda + \cos \alpha_3 / \lambda_i] + y [(\cos \beta_1 - \cos \beta_2) / \lambda + \cos \beta_3 / \lambda_i]]$$

$$a-b+c = 2 / \lambda_i [x(\cos \alpha_3 + F_x \lambda_i) + y(\cos \beta_3 + F_y \lambda_i)]$$

Luego:

$$J_{+1} = A_{30} K_f \sqrt{I_1 I_2} e^{-j 2 / \lambda_i [x(\cos \alpha_3 + F_x \lambda_i) + y(\cos \beta_3 + F_y \lambda_i)]} \quad 28.$$

El modo  $J_0$  no sufre difracción y continúa en la misma dirección del haz incidente.

Los ángulos formados por el modo  $J_{+1}$  del haz difractado son:

$$\cos \alpha_4 = \cos \alpha_3 + F_x \lambda_i = \cos \alpha_3 + \lambda_i / d_x \quad 29.$$

$$\cos \beta_4 = \cos \beta_3 + F_y \lambda_i = \cos \beta_3 + \lambda_i / d_y \quad 30.$$

$$\cos \alpha_4 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_3 - \cos^2 \beta_4} \quad 31.$$

de igual manera en el término  $J_{-1}$

$$c-a+b = 2 / \lambda_i [x(\cos \alpha_3 - F_x \lambda_i) + y(\cos \beta_3 - F_y \lambda_i)]$$

$$J_{-1} = A_{30} K_f \sqrt{I_1 I_2} e^{-j 2 / \lambda_i [x(\cos \alpha_3 - F_x \lambda_i) + y(\cos \beta_3 - F_y \lambda_i)]} \quad 32.$$

Los ángulos formados por el modo  $J_{-1}$  del haz difractado son:

$$\cos \alpha_5 = \cos \alpha_3 - F_x \lambda_i = \cos \alpha_3 - \lambda_i / d_x \quad 33.$$

$$\cos \beta_5 = \cos \beta_3 - F_y \lambda_i = \cos \beta_3 - \lambda_i/d_y \quad 34.$$

$$\cos \alpha_5 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_3 - \cos^2 \beta_5} \quad 35.$$

Para el caso especial de un haz iluminando una placa ubicada en el plano XY, Z=0, se tiene de las ecuaciones 29 y 30:

$$dx = \lambda_i / (\cos \alpha_4 - \cos \alpha_3) \quad 36.$$

Y de manera análoga:

$$dy = \lambda_i / (\cos \beta_4 - \cos \beta_3) \quad 37.$$

En este juego de ecuaciones  $\alpha_3$  y  $\beta_3$  son funciones de las condiciones de iluminación y de otro lado  $\alpha_4$  y  $\beta_4$  dependen de la posición del punto y del observador, cumpliéndose:

$$\cos \alpha_4 = x / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad 38.$$

Y

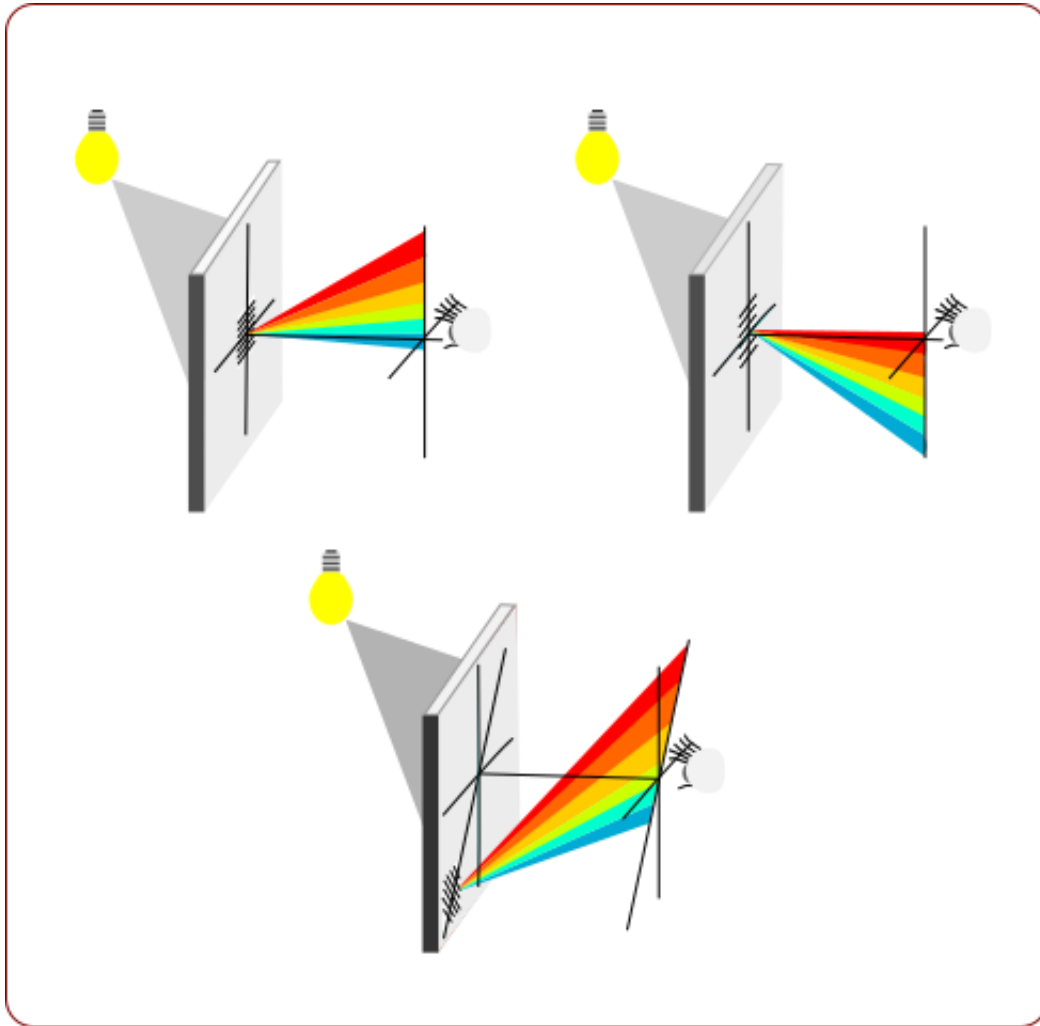
$$\cos \beta_4 = y / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad 39.$$

Reemplazando 38 y 39 en la ecuación 14, se obtiene

$$d = \frac{\lambda_i}{\sqrt{\cos^2 \alpha_4 + 2 \cos \alpha_4 \cos \alpha_3 + \cos^2 \alpha_3 + \cos^2 \beta_4 + 2 \cos \beta_4 \cos \beta_3 + \cos^2 \beta_3}} \quad 40.$$

Con estas ecuaciones se establece el algoritmo de cálculo de los parámetros de registro de cada holopixel, de esta forma, definiendo la longitud de onda que se desea observar en la ubicación del observador y la posición en el holograma del holopixel (Figura 21), se calcula su periodo espacial  $d$  y su ángulo de inclinación  $\Phi$ .

Definido  $d$  con la ayuda de la ecuación 14, se calcula el arreglo espacial que deben tener los haces del láser de registro, de forma que incidan sobre la placa holográfica y generen las rejillas de difracción. El ángulo  $\Phi$  define la ubicación del plano de incidencia de los haces como se muestra en la Figura 19, normales al patrón de franjas.



*Figura 21. Comportamiento de la difracción de luz blanca ante diferentes rejillas.*

Es por lo tanto posible calcular los diversos parámetros experimentales (periodo y orientación) de cada rejilla a registrar a partir de los efectos visuales deseados [43], [44].

## 4. Implementación Experimental

Para realizar el análisis cualitativo de los sistemas de registro de hologramas de puntos con rejillas de difracción, se diseñan y construyen dos dispositivos, uno por cada uno de los principios expuestos, que realizan las funciones básicas de una holoimpresora. En los dos casos el sistema consta de tres componentes: a) un sistema óptico para la generación de las franjas de interferencia, b) un sistema mecánico para el posicionamiento de cada una de las redes puntuales, esto es, un hardware de movimiento en X y Y, y c) un software que incorpora los algoritmos necesarios para la determinación de los parámetros del registro y que además controla el sistema, sus secuencias, y tiempos, además que permite dibujar las formas básicas que serán registradas para la valoración y verificación del sistema.

### 4.1 Modelo óptico

#### 4.1.1 Configuración del sistema óptico.

La Figura 22, muestra un esquema del arreglo experimental construido y sus componentes. Un haz laser con longitud de onda de 633nm y un diámetro de haz de 1mm es usado como fuente de luz, es dividido por un divisor de haz (BS) y con ayuda del espejo E, el rayo principal y el secundario son ajustados para coincidir justo en el medio de registro, a un ángulo determinado para generar las rejillas con el periodo deseado  $d$ . La placa de registro es colocada en un sistema de desplazamiento X, Y, el cual es controlado para recorrer el área de registro.

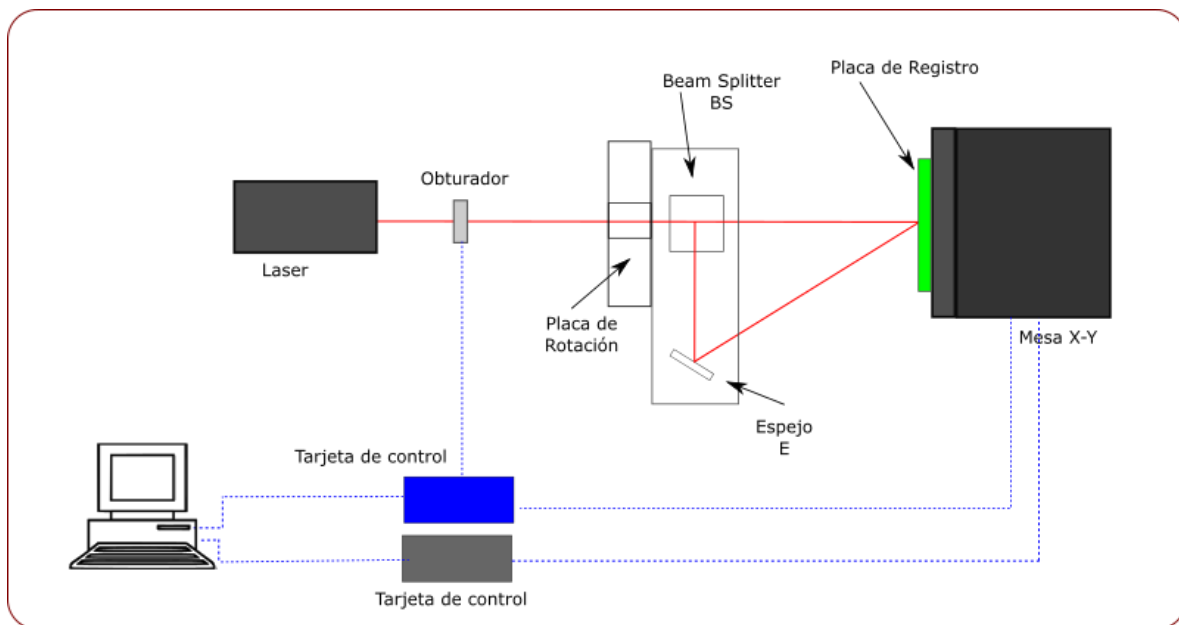
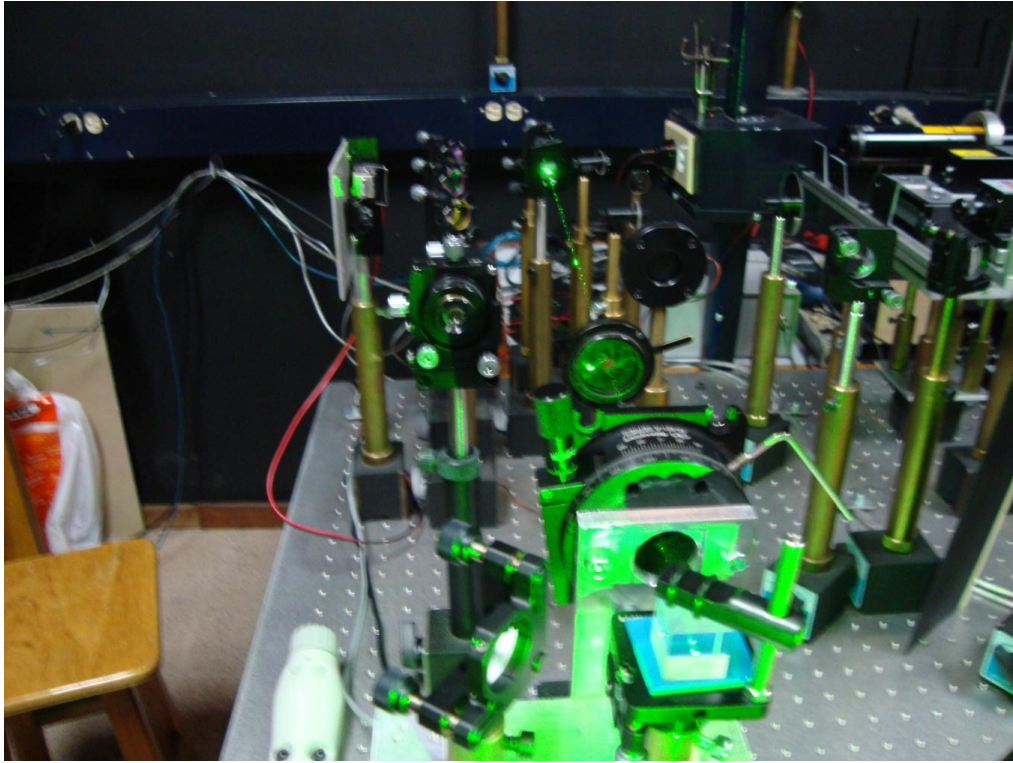


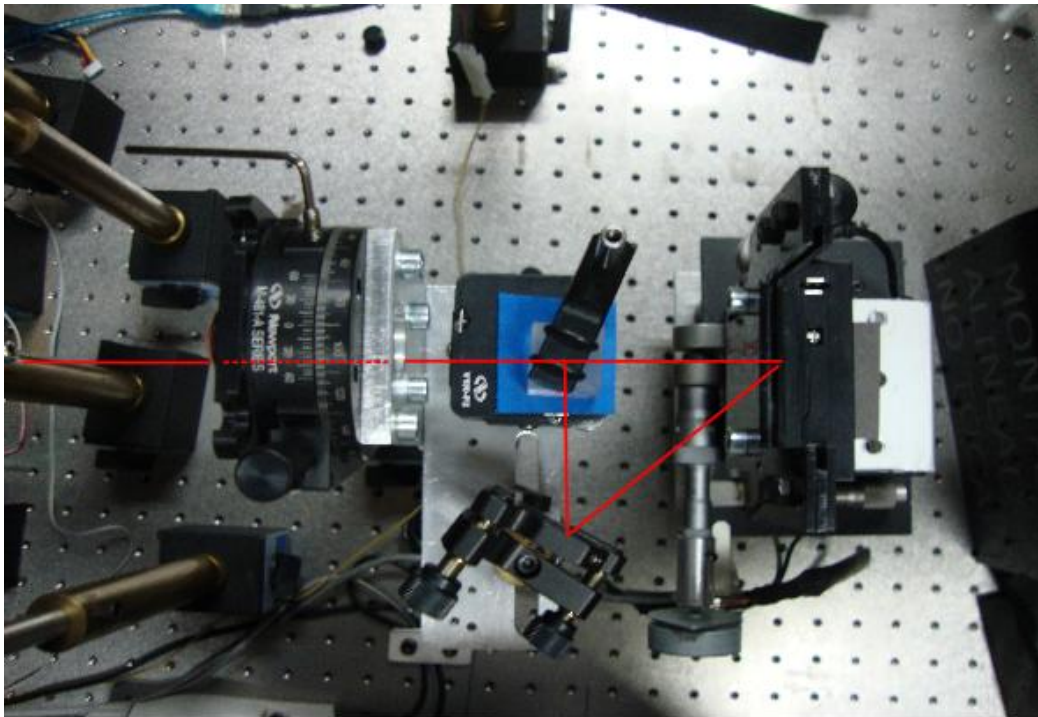
Figura 22. Arreglo óptico para generación y registro de puntos con rejilla de difracción.

El sistema óptico BS (Beam Splitter) y E (Espejo) son montados en una placa de rotación que permite girar teniendo como eje hipotético el haz, para variar la inclinación  $\Phi$  de las rejillas; en el sistema implementado este giro se realiza de forma manual.

Para el montaje (Figura 23 y Figura 24) se utilizaron bases de desplazamiento, acopladas a 90 grados, formando la mesa XY y una base giratoria para soportar y dar la capacidad de rotación.



*Figura 23. Detalle del montaje óptico.*



*Figura 24. Detalle del montaje óptico, vista superior.*

### 4.1.2 Sistema Mecánico.

Los movimientos en el eje X fueron implementados con un motor paso a paso controlado desde una plataforma Arduino y comandados desde el software [45], [46] desarrollado en Matlab.

Los movimientos en el eje Y fueron implementados con un motor nanométrico y driver a su vez comandado por la misma interface de Matlab.

Como obturador se utiliza un dispositivo estándar de cámara comandado desde la plataforma Arduino y controlada desde el programa principal en Matlab.

### 4.1.3 Software.

El software para controlar todo el sistema se compone de varias interfaces así:

- **Interface de calibración (Dot Matrix)** donde se inicializan los puertos de comunicación a las tarjetas de control, además de realizar recorridos de prueba para el chequeo de las secuencias y la precisión del posicionamiento de sistema XY.(Figura 25).

Este módulo también permite realizar calibraciones del obturador y los tiempos de obturación, para ello se desarrolló un programa en Arduino que con ayuda de un sensor fotoeléctrico que permite conocer los tiempos de apertura reales.

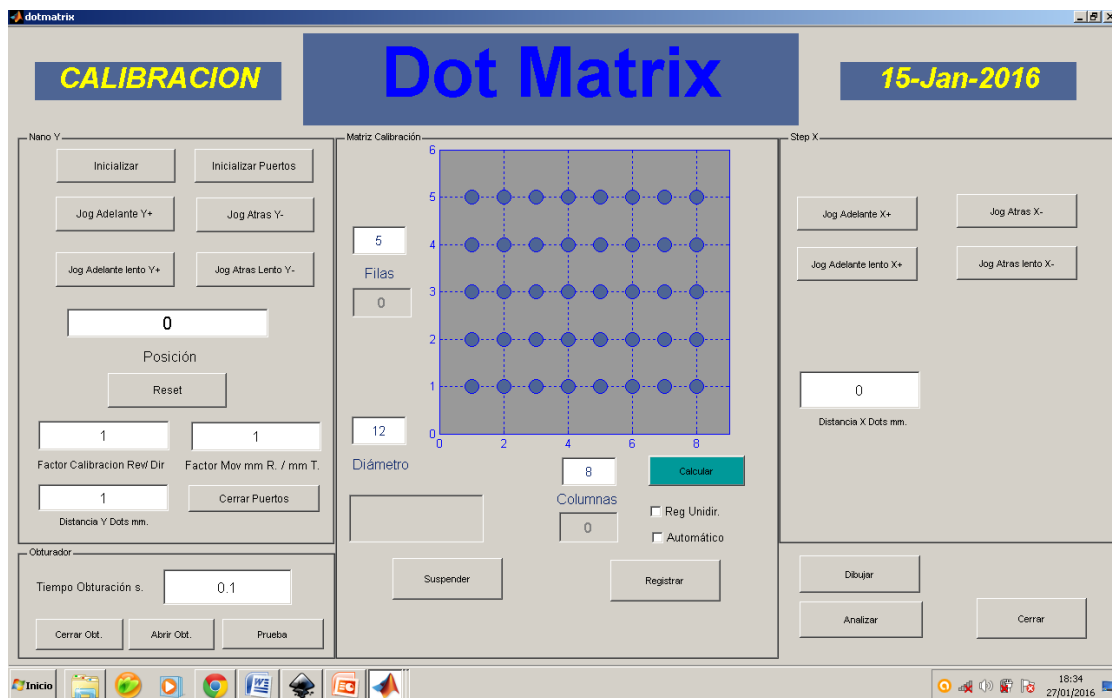
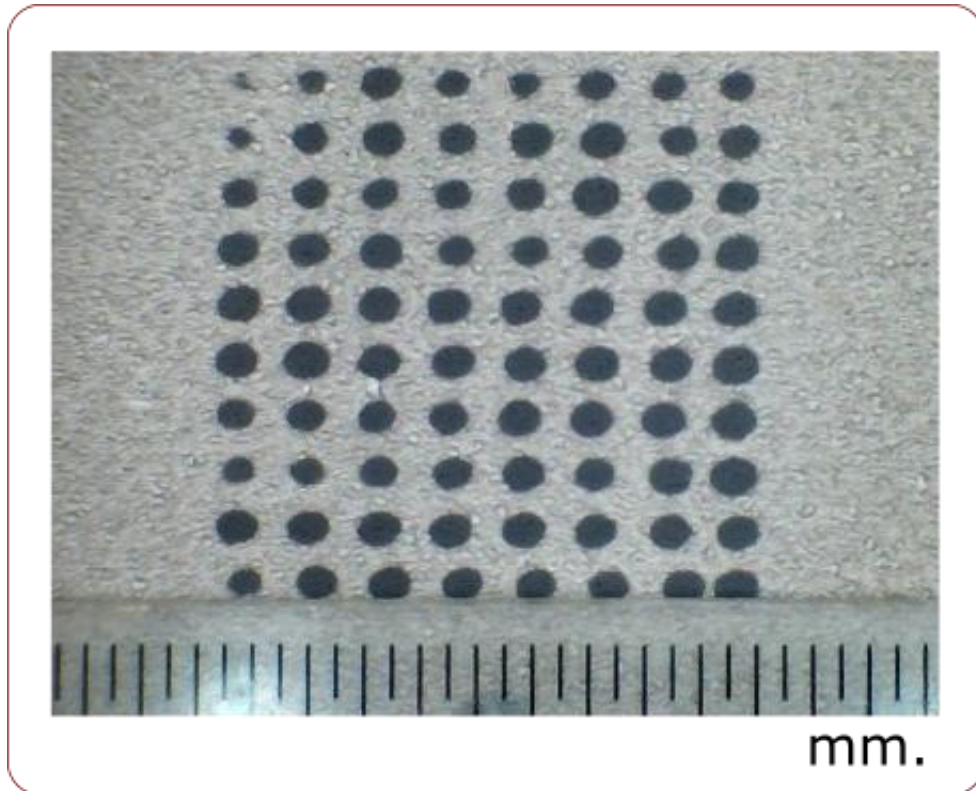


Figura 25. Pantalla principal de interface de calibración de Software dot matrix

La calibración de distancias y secuencia de movimientos se realizó sobre papel térmico, procedimiento que redujo los costos del desarrollo del software y la sincronización de las diferentes secuencias utilizadas para el registro. La Figura 26 muestra un ejemplo de los registros y la medición de los movimientos realizados por el sistema.



*Figura 26. Puntos grabados sobre papel térmico usado para la calibración de movimientos.*

En la interface mostrada en la Figura 25, también es posible posicionar el sistema y programar otros parámetros tales como: el número de puntos, su distanciamiento y el tiempo de exposición para el registro de los holopixeles

- **Interface de dibujo (DotHolo)** en la cual se puede dibujar pixel a pixel seleccionando la longitud de onda deseada de reconstrucción, y sobre el cual se calculan los parámetros de la rejilla dependiendo su posición, longitud de onda, y ángulo de iluminación. En la Figura 27 se aprecian los diversos componentes de la interface, en ella es posible seleccionar un fondo, o dibujar punto a punto un color deseado, también es posible guardar el archivo en forma de matriz numérica para su

trabajo posterior o abrirlo para editarlo en algún momento dado. La paleta de colores deseado se escogió con las siguientes longitudes de onda  $\lambda$ :

$\lambda$ nm	Color
430	Magenta
470	Azul
490	Celeste
535	Verde
590	Amarillo
605	Naranja
630	Rojo

Tabla 1. Longitudes de onda  $\lambda$  seleccionada para la paleta de colores.

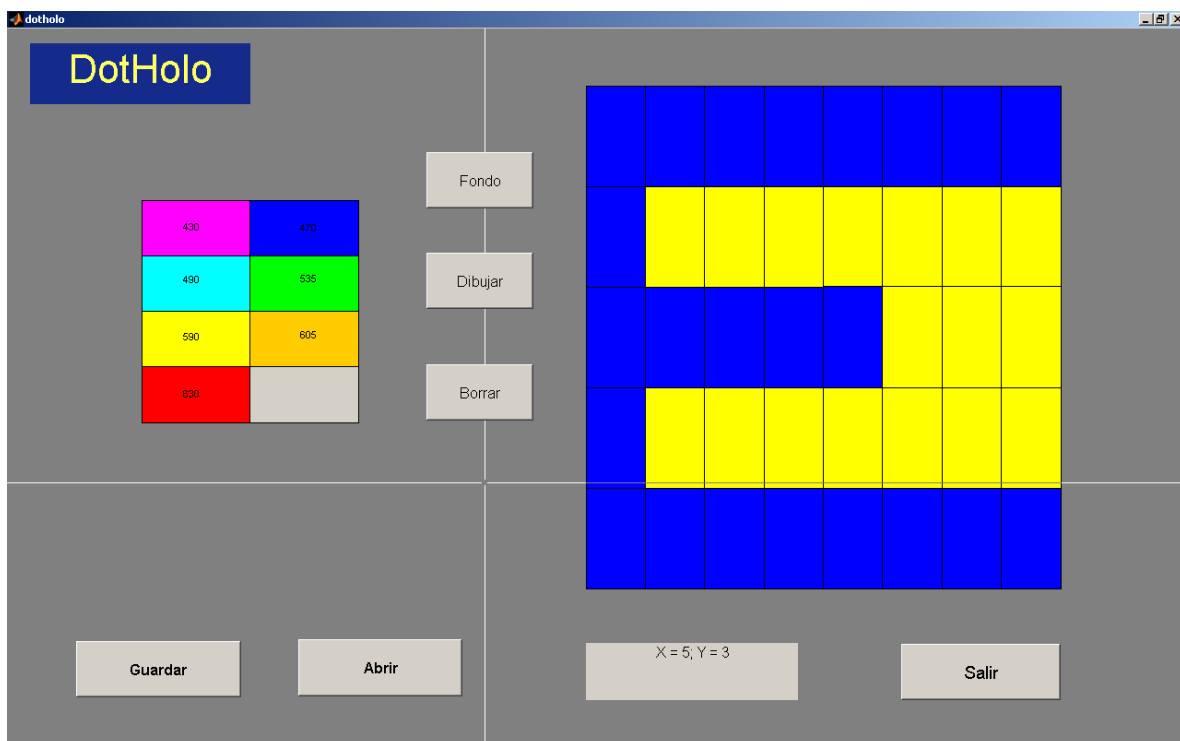


Figura 27. Pantalla de interface DotHolo, para dibujar arreglo de puntos con su color deseado.

- **Interface de registro (Registro)** en la cual se va mostrando el avance del registro punto a punto de acuerdo al diseño seleccionado. Se desarrolló un algoritmo para buscar siempre el punto a grabar más cercano de igual color, para optimizar de esta forma el tiempo de registro. En la Figura 28 se muestra la interface de registro desde donde se controla a cada momento el estado de la grabación de los patrones. Los módulos de interface de dibujo **DotHolo** y **Registro** son comunes para los dos sistemas a evaluar, los módulos de parametrización e inicialización de componentes son específicos para cada sistema dado que todo el control de movimiento es diferente.

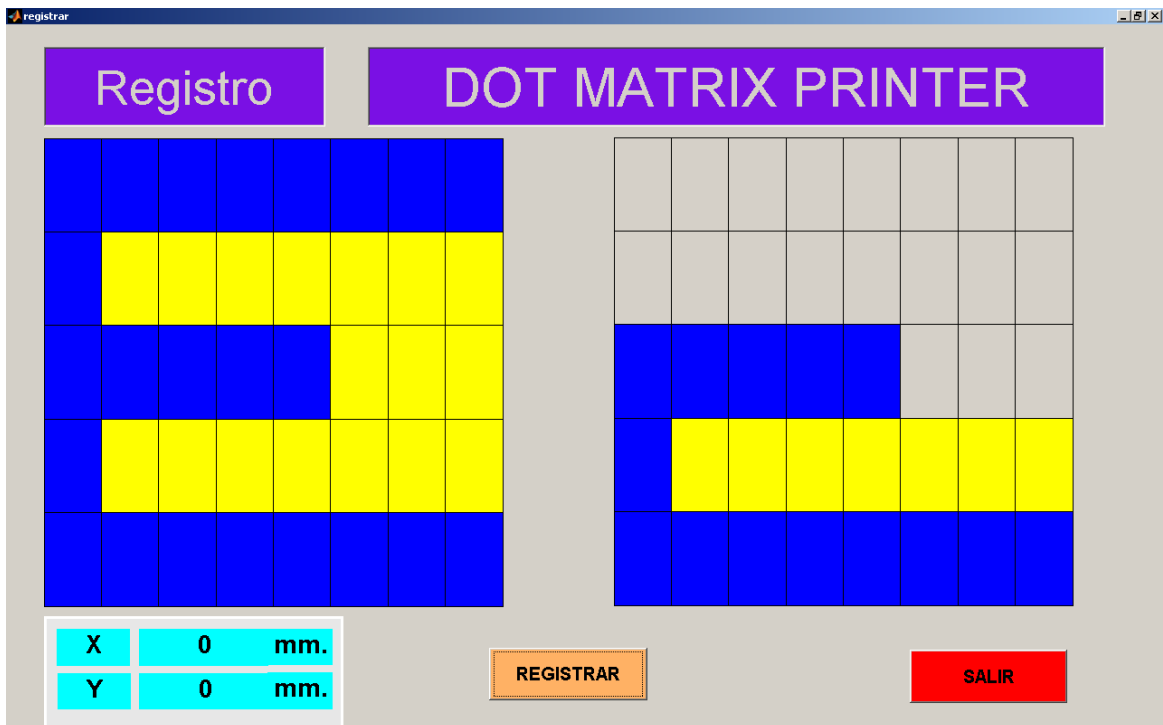


Figura 28. Interface de Registro para el control de la grabación punto a punto mostrando el avance del registro.

## 4.2 Modelo opto electrónico.

### 4.2.1 Principio óptico

Existen varios principios para generar micro rejillas de difracción basados en moduladores espaciales de luz (SLM), dependiendo del tipo de imagen que se proyecte en el modulador. En este trabajo se implementa el método mostrado en la Figura 29 que consiste en generar en el modulador

una máscara con dos aperturas que posibilitan obtener dos haces con la correcta separación y ángulo de manera que generan un patrón de interferencia en el plano focal de una lente de escritura.

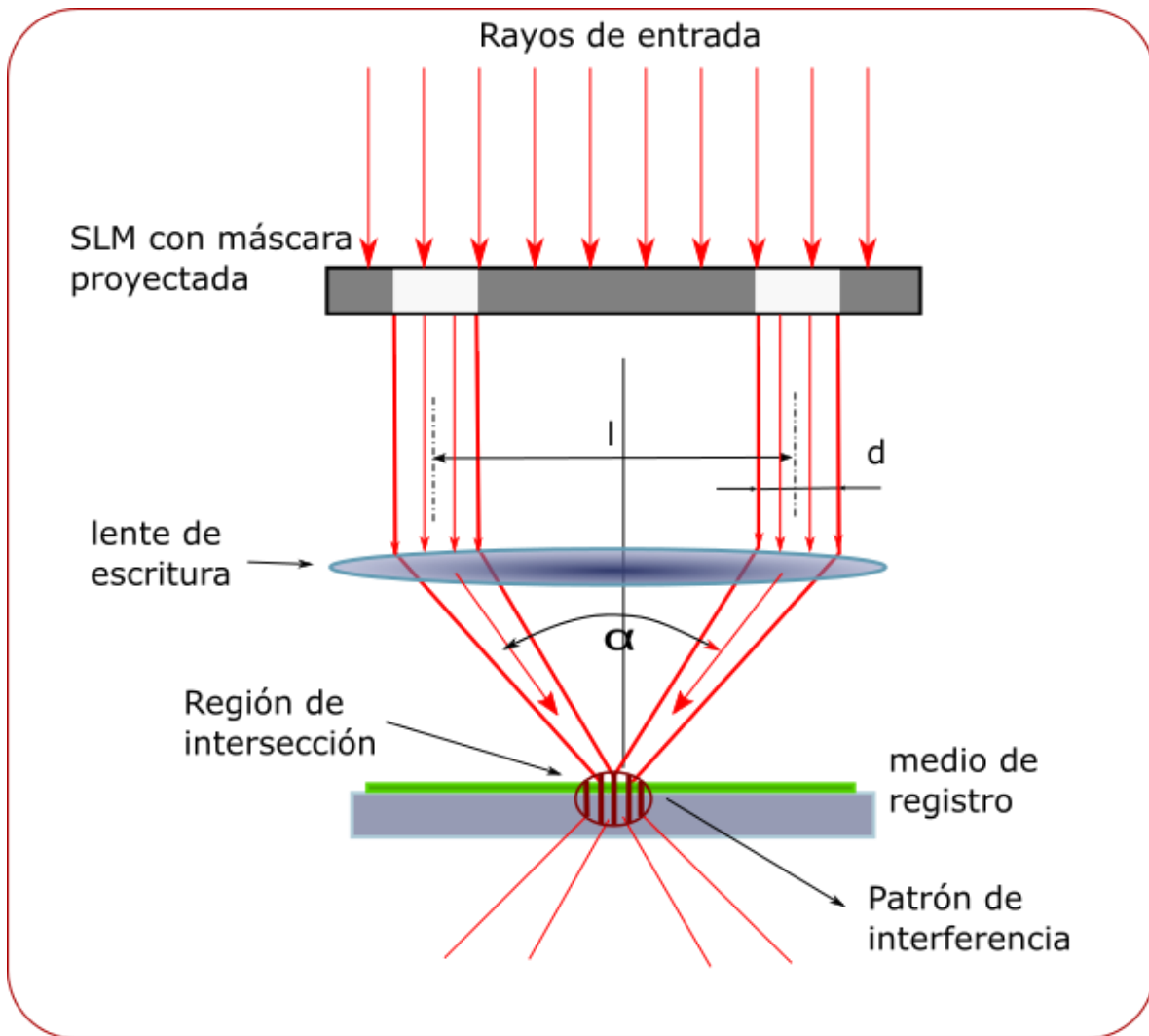


Figura 29. Generación de micro rejillas de difracción con dos haces formados en el SLM.

Los parámetros de aperturas cuadradas proyectadas en el modulador son calculados a partir de las ecuaciones 14, 15 y 40, además teniendo en cuenta los parámetros ópticos del montaje, tales como magnificación, resolución del modulador espacial y distancia focal de la lente de escritura, de forma tal que se produzcan rejillas con un periodo de acuerdo a la longitud de onda que se desea observar en determinada posición. De esta forma puntos con mayor distancia generan rejillas con menor periodo espacial  $d$ , igualmente dependiendo la posición del punto se calcula una inclinación de los

puntos para generar una rotación en la rejilla de difracción tal como se ve en la Figura 30, de acuerdo a lo explicado en la sección 3.1.

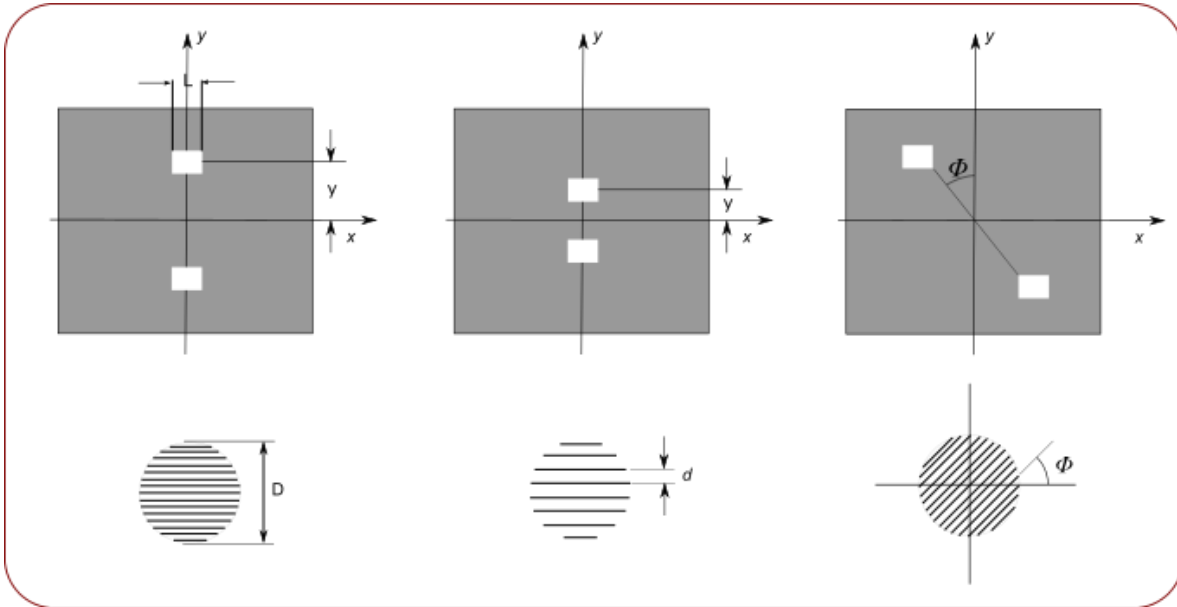


Figura 30. Influencia de los parámetros de la imagen proyectada en el modulador espacial sobre la formación de rejillas de difracción.

#### 4.2.2 Sistema Mecánico.

Para la implementación de este sistema se utilizaron dos desplazadores lineales acoplados en una configuración XY, controlados directamente por el software desarrollado en Matlab [47], [48].

El obturador utilizado consiste de un dispositivo estándar de cámara comandado desde la plataforma Arduino y controlada desde el programa principal en Matlab.

#### 4.2.3 Software.

Para los dos desplazamientos (XY), se desarrollo una interface (Figura 31) adicional a las descritas en el parágrafo 4.1.3, para el control y calibración del movimiento. Esta interface consta de seis módulos cuyas funciones son:

Inicializar: Donde se inicializan los puertos de comunicaciones con las mesas de desplazamiento lineal y el Arduino, además se programan las velocidades de desplazamiento.

Posicionar X y Y: permite desplazar manualmente el posicionador en el eje X o Y, la cantidad seleccionada, también es posible llevar a la posición 0 absoluta de las mesas para inicializar sus recorridos.

Parámetros: es una interface de captura de los parámetros de la matriz a registrar, la distancia entre puntos, el tiempo de obturación, los retardos antes y después de la obturación, también es posible seleccionar el número de columnas y filas del arreglo a registrar.

Tiene un indicador central en tiempo real que muestra la ubicación de la mesa respecto al origen en mm, además de permitir grabar una posición de origen y posicionarse en ella en cualquier momento. También tiene dos botones para pasar a las interfaces de dibujo o registro.

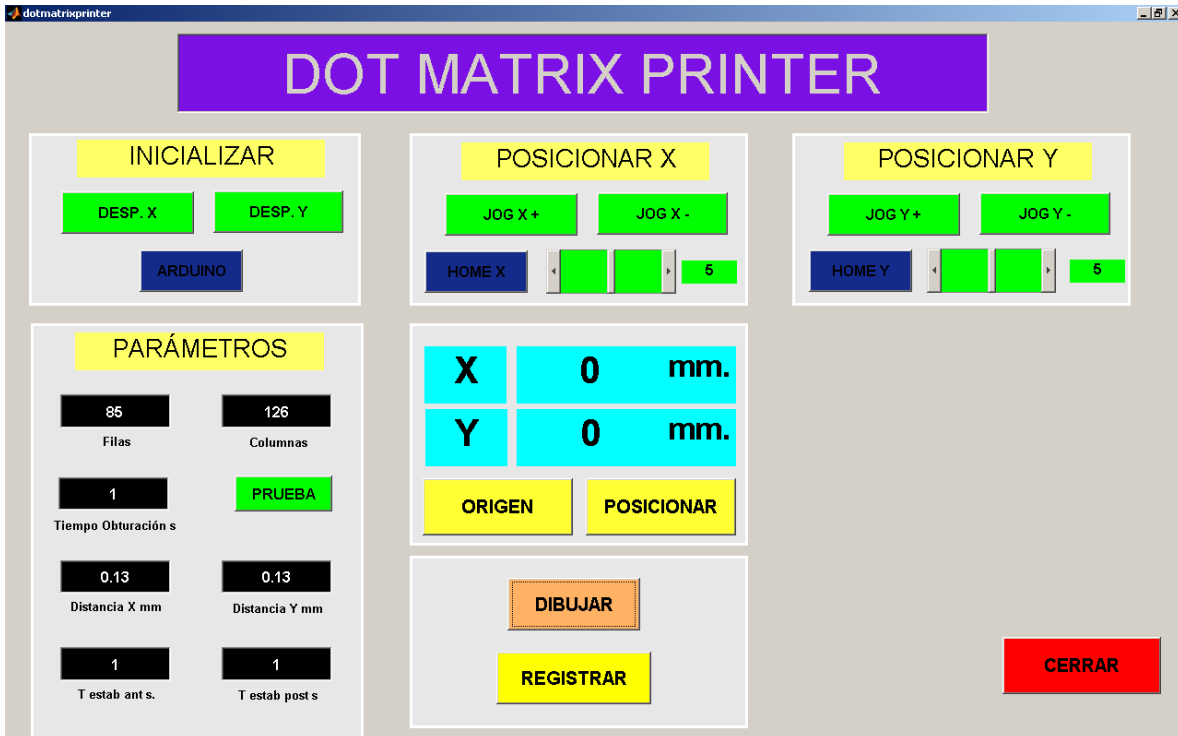


Figura 31. Interface de control, calibración y posicionamiento del sistema.

### 4.3 Algoritmos

Para los dos sistemas de generación y registro usados, se desarrolló en el presente trabajo un algoritmo de tratamiento de imágenes, el cual, con los parámetros del sistema óptico, esto es el ángulo de iluminación  $\alpha_3$  y  $\beta_3$ , la posición XY del punto a registrar, la posición del observador Z y la longitud de onda deseada de reconstrucción, basados en las ecuaciones 14 y 40 calcula punto a

punto el periodo espacial de la rejilla  $d$  y su orientación  $\Phi$  de acuerdo a la posición en el registro, relativa al centro del mismo. El software **DotHolo** mostrado esquemáticamente en la Figura 32 genera los arreglos  $s(i,j)$  y  $\Phi(i,j)$ , los cuales almacenan la información requerida para el registro pixel por pixel.

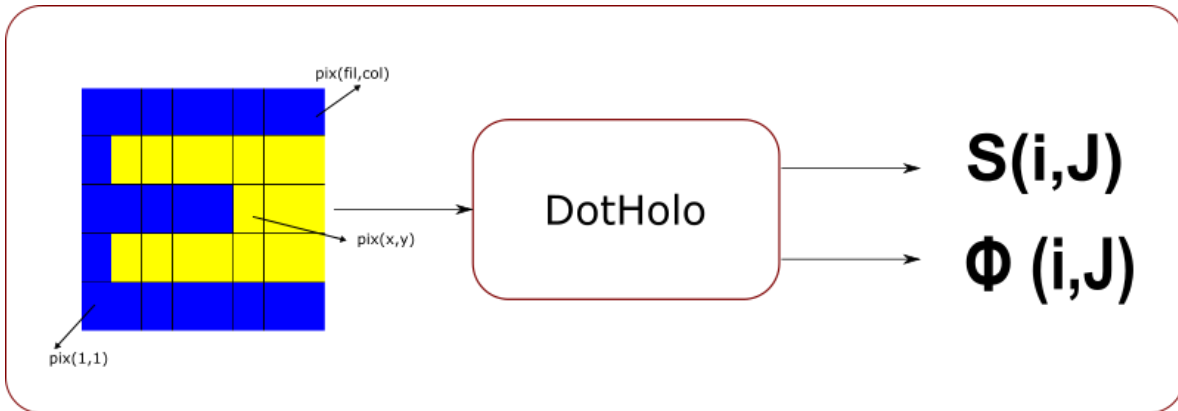


Figura 32. Procesamiento de parámetros numéricos a partir de una imagen.

También es posible usar imágenes importadas en formatos de gráficos, para ello se implementó un algoritmo (Figura 33), que toma la imagen de los formatos estándar (bmp, jpg, png) , lo binariza y escala de acuerdo al número de puntos (holopixel) a grabar, pudiendo realizar la escogencia de colores (longitudes de onda) deseados y realizar los cálculos en el software.



Figura 33. Tratamiento de archivos de imágenes.

Para el registro se sigue un algoritmo esquematizado en la Figura 34, que realiza las siguientes funciones básicas: posicionar la placa, teniendo en cuenta los parámetros  $\Delta x$   $\Delta y$  de distancia de registro entre las filas las columnas, ajustar los parámetros ópticos de acuerdo a las matrices  $s(i,j)$  y  $\Phi(i,j)$  calculados previamente, obturar para lograr el registro de cada punto de acuerdo al tiempo programado. En cada paso que involucra un movimiento físico del sistema se incorporan retardos de tiempo para lograr la estabilización del sistema óptico ante cualquier posible vibración generada. La Figura 34 esquematiza el algoritmo de registro.

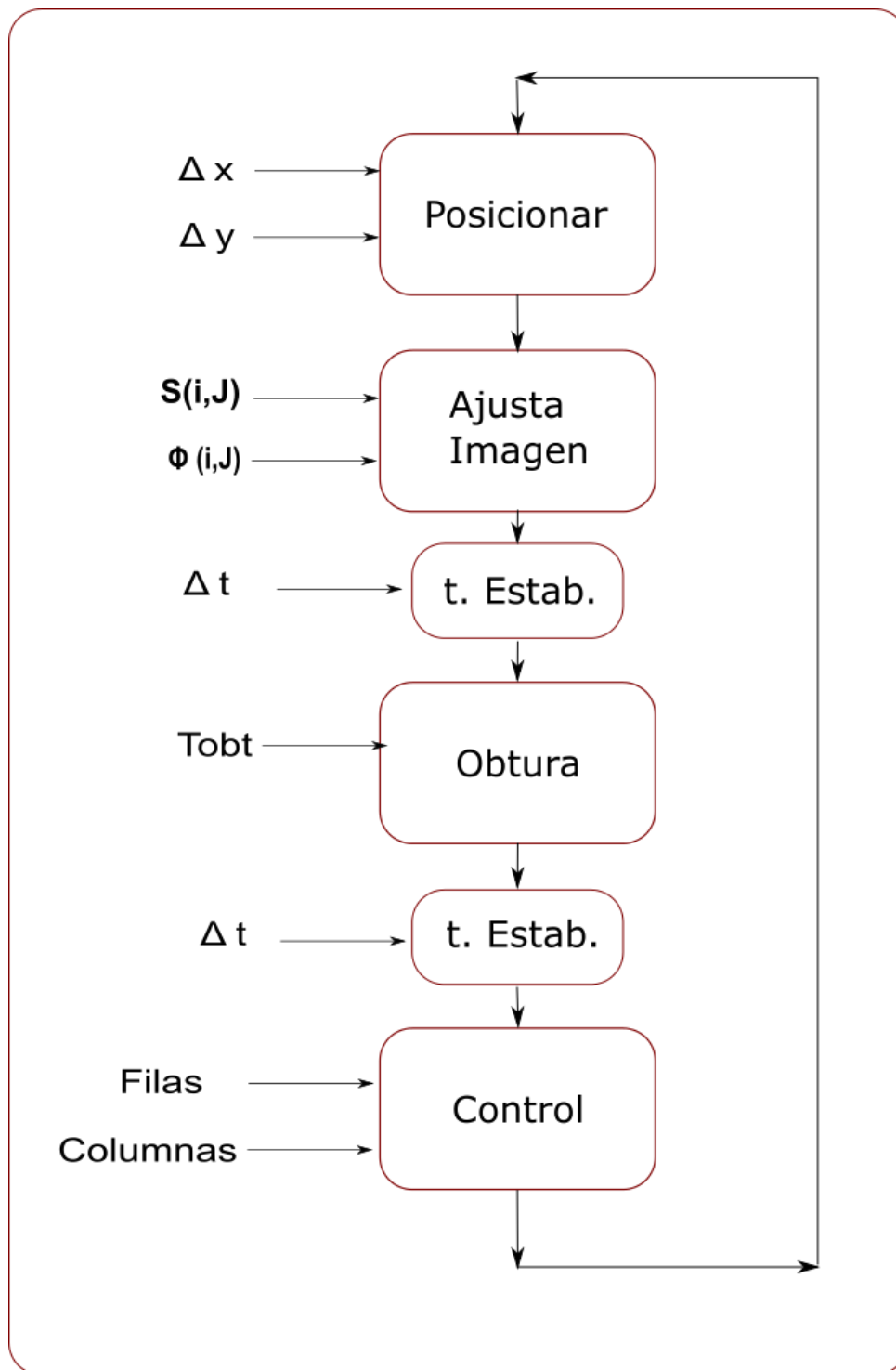


Figura 34. Esquema general de algoritmo de control de registro.

## 5. Resultados Experimentales

Se planteó como objetivo de los experimentos validar los modelos teóricos estudiados y establecidos, verificar la confiabilidad y robustez de los sistemas tanto hardware como software desarrollados, para poder tener un mayor criterio para evaluar la factibilidad de los sistemas de registro de matriz de punto. Para esto se realizan registros en cada uno de los modelos.

### 5.1 Modelo Óptico

#### 5.1.1 Montaje

De acuerdo al arreglo experimental descrito en la Figura 22 se realizó el montaje óptico mostrado en la Figura 35 y la Figura 36. Los parámetros a controlar son el ángulo  $\alpha$  para determinar el periodo de las rejillas y el parámetro  $\Phi$  que define la orientación de la rejilla y cuya rotación se realiza alrededor del eje definido por el haz de entrada.

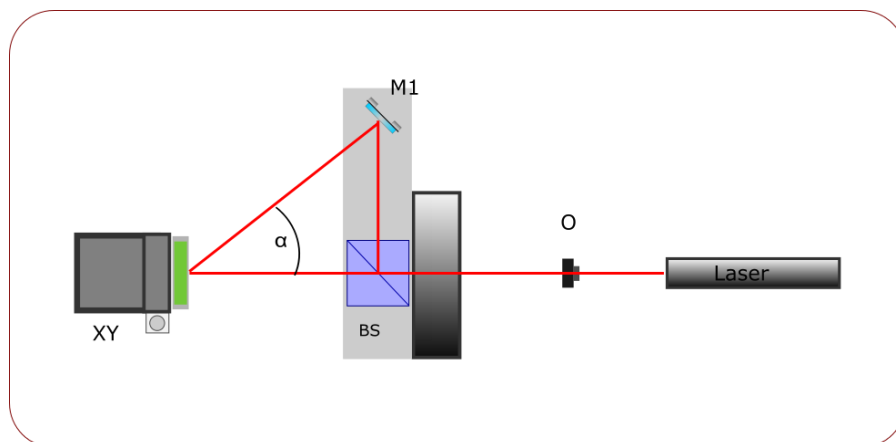


Figura 35. Montaje óptico realizado para el desarrollo experimental.

El sistema implementado para este experimento parte de un Laser He Ne de 633 nm, el obturador, la óptica compuesta por un beam splitter no polarizador (BS) y un espejo (M1), montados sobre una pequeña plataforma, que a su vez esta acoplada a una mesa giratoria, que permite registrar rejillas a diversos ángulos, ver Figura 36.

Se construyó un sistema XY basado en dos mesas de desplazamiento montadas a  $90^\circ$ . El eje Y se controla con un motor nanométrico y para el eje X se usó un motor de pasos convencional 200pasos/vuelta, resolución  $1.8^\circ$ /paso, velocidad 60 pulsos/seg, acoplado al tornillo micrométrico de la base.

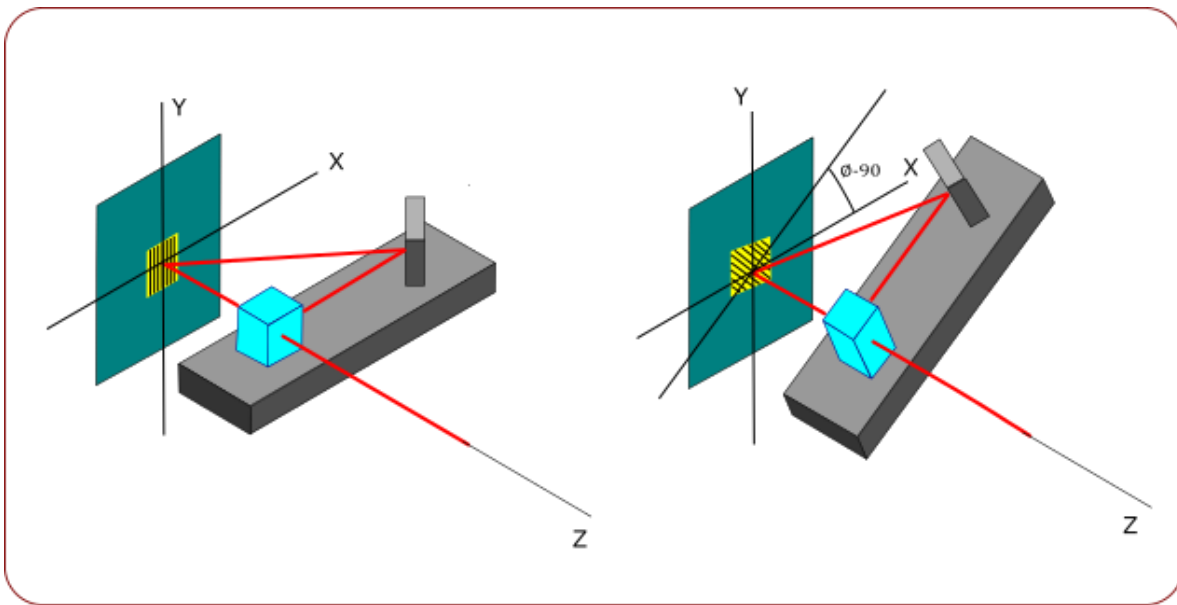


Figura 36. Registro de rejillas con diferentes orientaciones.

### 5.1.2 Parámetros de ensayos

Se calculó con los métodos teóricos expuestos (ecuación 18) la geometría requerida, esto es las distancias y los ángulos requeridos para el registro de diferentes geometrías tales como letras “E” y cuadrados de un solo color.

Las variables del ensayo se resumen en la Tabla 2:

Ángulo incidencia luz de reconstrucción	$\Theta$	30	grados
$\lambda$ de laser de registro	$\lambda_r$	633	nm
$\lambda$ deseada de reconstrucción	$\lambda_o$	590	nm
Distancia x rejilla	x	10	mm
Distancia y rejilla	y	10	mm
z observador	z	500	mm
Separación esperada	d	1.16	$\mu\text{m}$

Tabla 2. Variables de entrada para ensayo de registro.

Con estos datos de entrada se requirió ajustar las condiciones del montaje para el registro así:

Ángulo entre rayos de interferencia	$\alpha$	$31.67 \pm 0.5$	grados
Distancia beam splitter espejo BS-E	d1	$53 \pm 1$	mm
Distancia splitter - portaplaca	d2	$85.92 \pm 1$	mm
Camino óptico 1	OP1	$85.92 \pm 1$	mm
Camino óptico 2	OP2	$153.96 \pm 1$	mm
Diferencia	$\Delta\text{OP}$	$68.03 \pm 1$	mm

Tabla 3. Parámetros de ajuste para el montaje óptico.

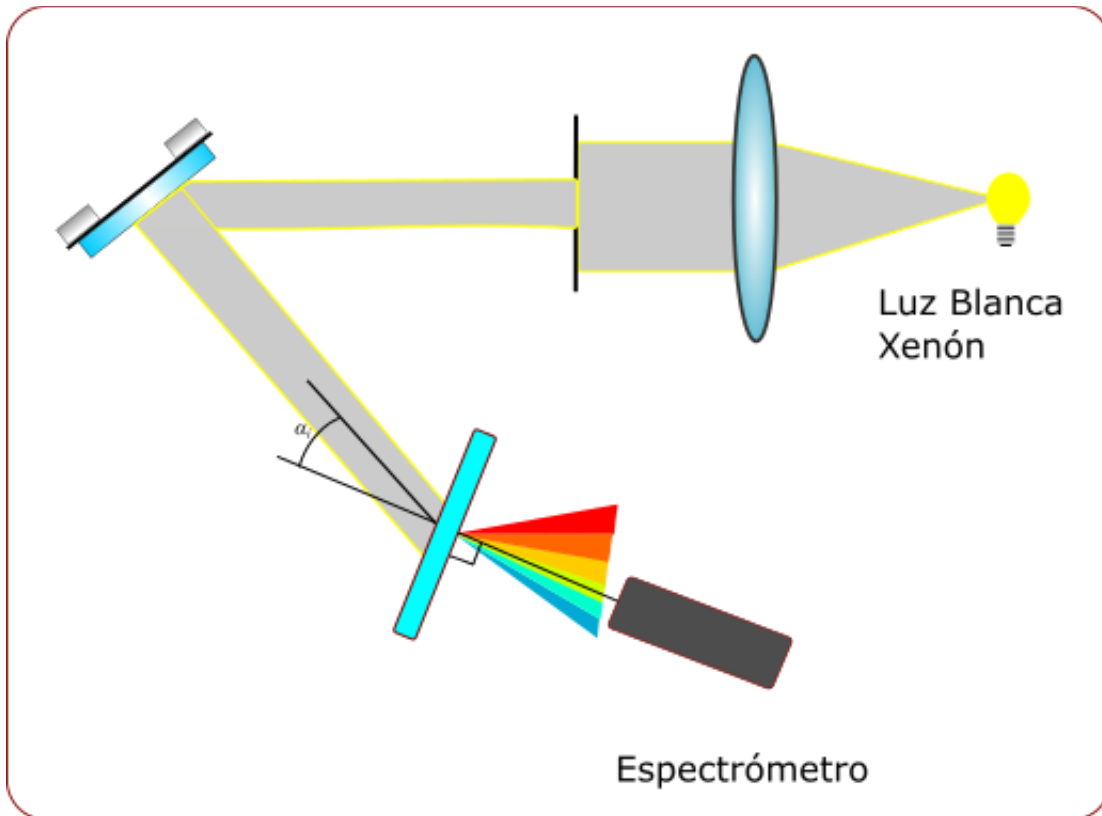
El registro se realiza sobre una placa holográfica Agfa 8E75, con los siguientes parámetros de exposición.

$I_{\text{total}}$ ( $\mu\text{W}$ )	Tiempo (s)	I/A ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	Exposición ( $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ )
3.8	$0.12 \pm 0.01$	215.03	25.8

Tabla 4. Parámetros de exposición.

### 5.1.3 Resultados


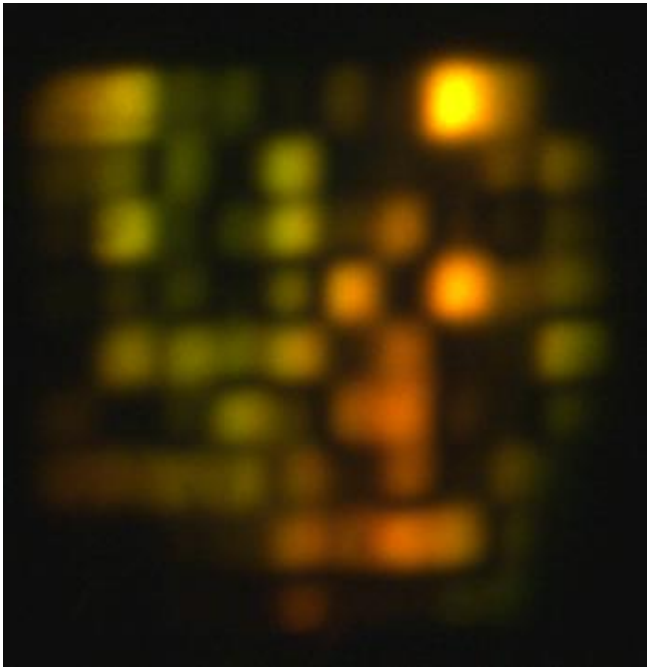
Para el análisis de las redes de difracción se realiza el montaje de la Figura 37, en el cual la luz blanca de una lámpara de xenón es usada para iluminar el holograma, con un ángulo de  $30^\circ$  igual al utilizado para el cálculo del registro. Con un espectrómetro se mide la longitud de onda de la luz difractada en la dirección normal a la placa

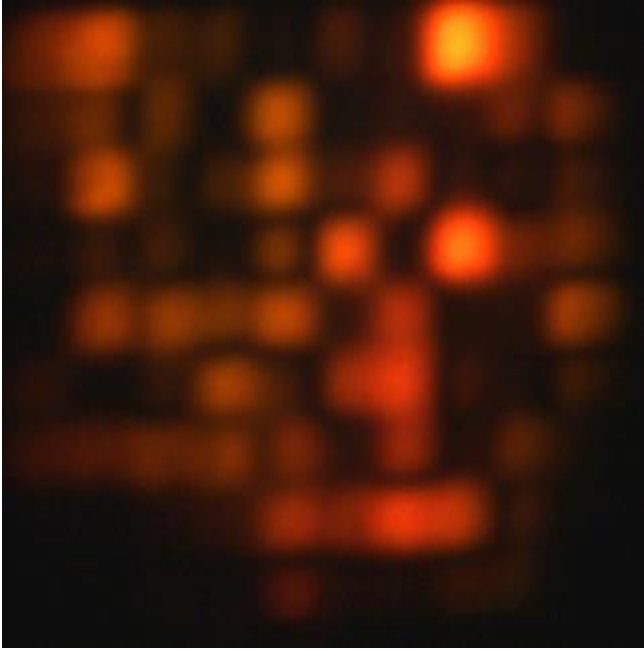
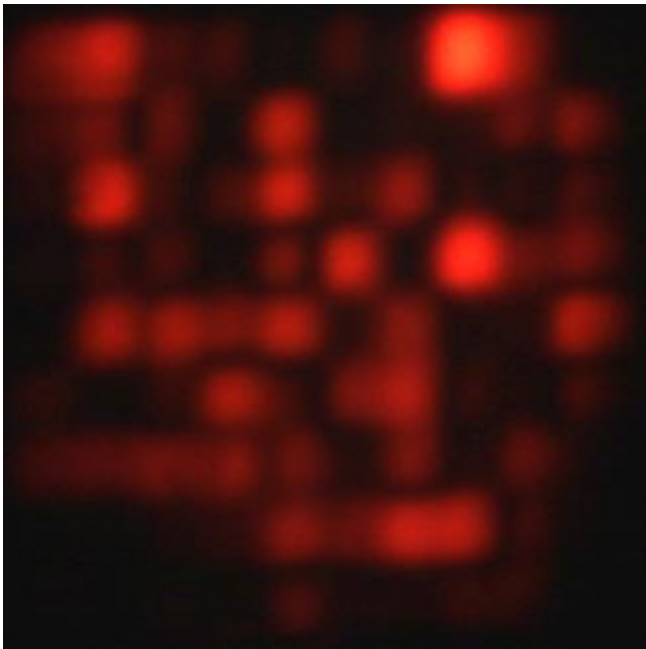


*Figura 37. Montaje óptico utilizado para la medición del espectro generado.*

En la

Tabla 5 se presentan las fotografías del registro iluminado a diferentes ángulos de incidencia.

Ángulo de iluminación	Imagen
26.5°	 A fluorescence microscopy image showing a field of cells. The cells exhibit bright blue fluorescence against a dark background, indicating the presence of a specific marker or protein. The spots are distributed across the field of view.
29.5°	 A fluorescence microscopy image showing a field of cells. The cells exhibit bright yellow and orange fluorescence against a dark background, indicating the presence of a different marker or protein. The spots are distributed across the field of view.

<p>30°</p>	
<p>30.5°</p>	

*Tabla 5. Imágenes de los dots a diferentes ángulos de observación.*

Para cada uno de estos resultados se registró el espectro y se midió la longitud de onda difractada. Las gráficas de los espectros se muestran en las Figura 38 a 42, variando el ángulo de iluminación sobre la placa.

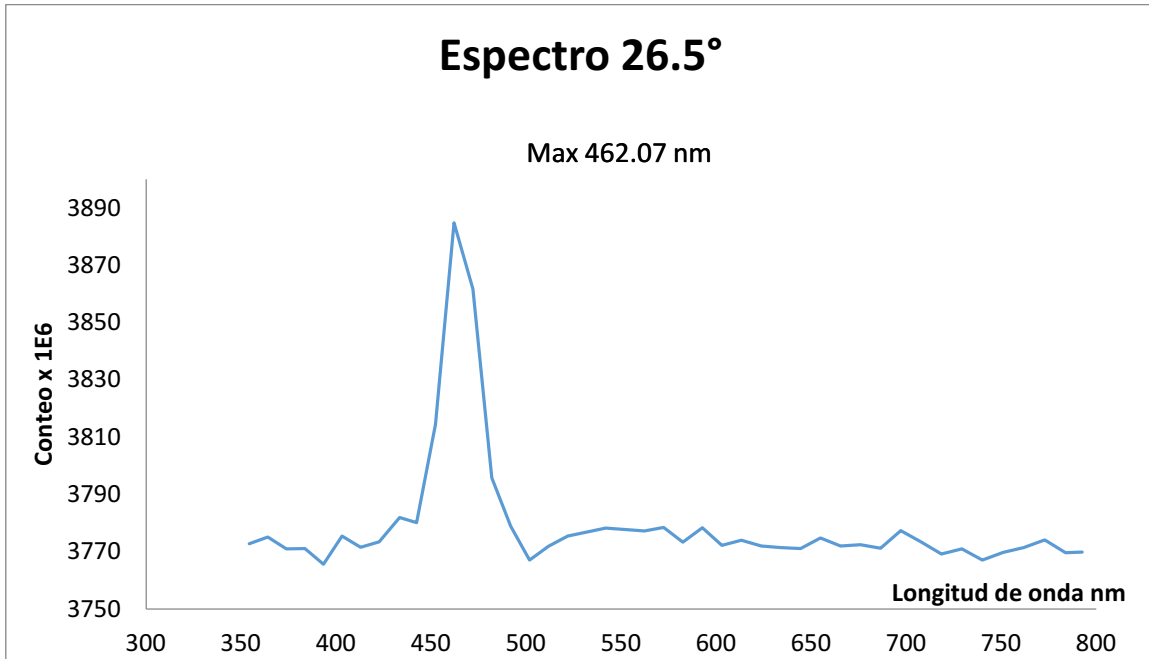


Figura 38. Espectro observado a 26.5°.

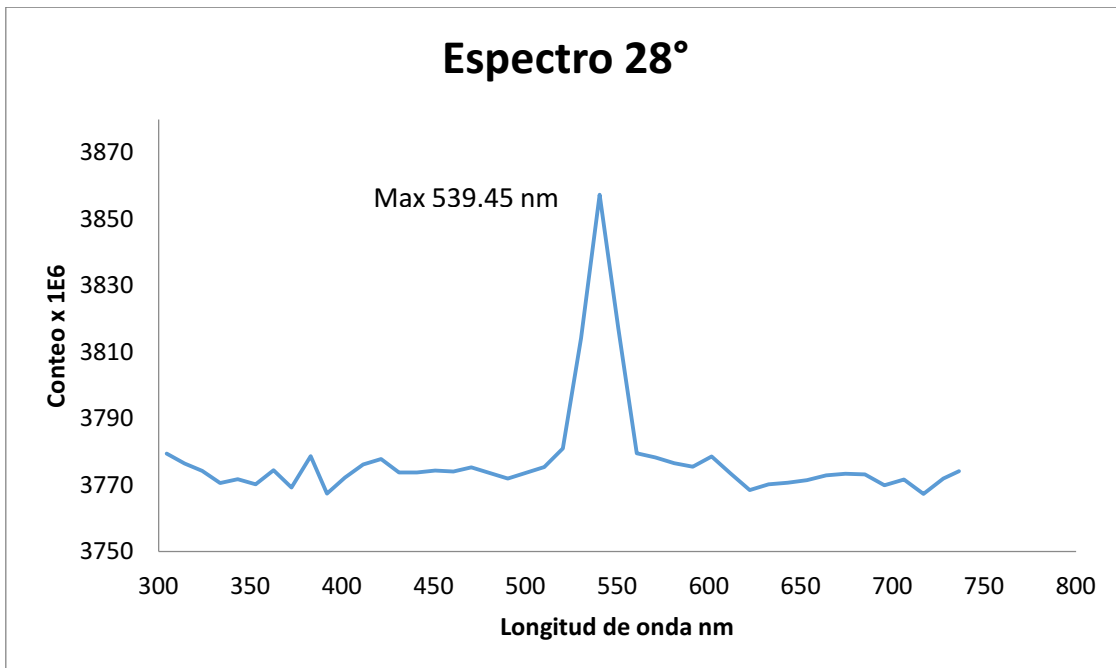


Figura 39. Espectro observado a 28°.

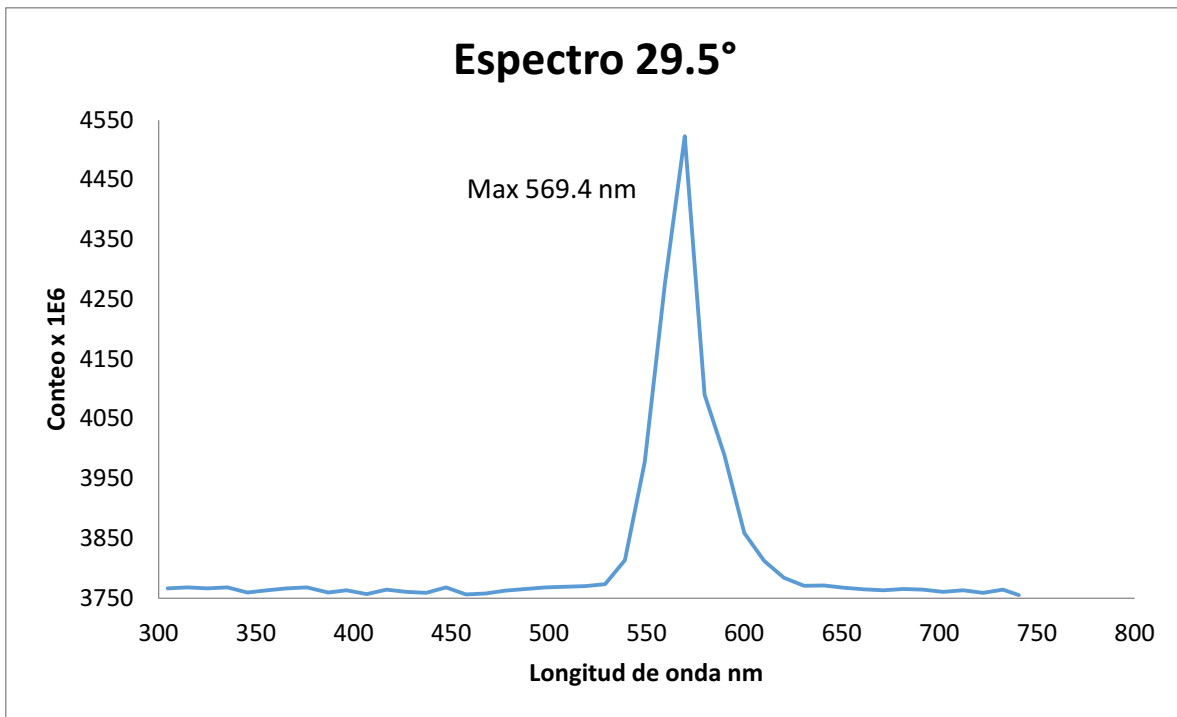


Figura 40. Espectro observado a 29.5°.

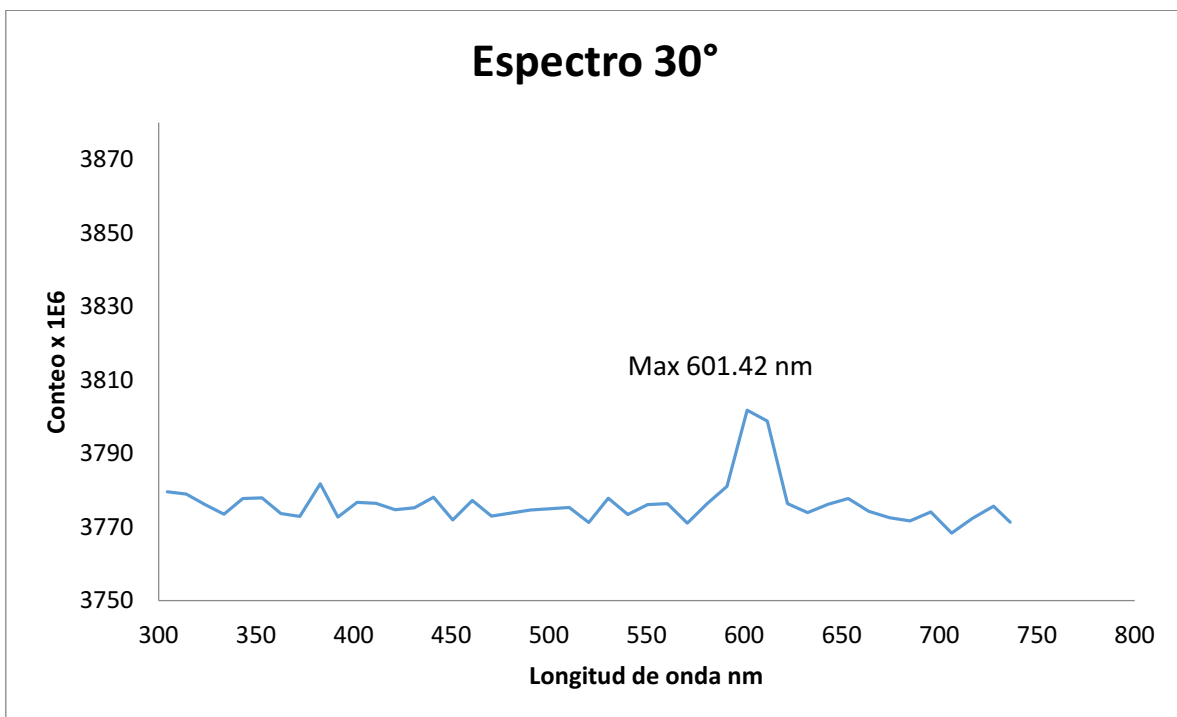


Figura 41. Espectro observado a 30°.

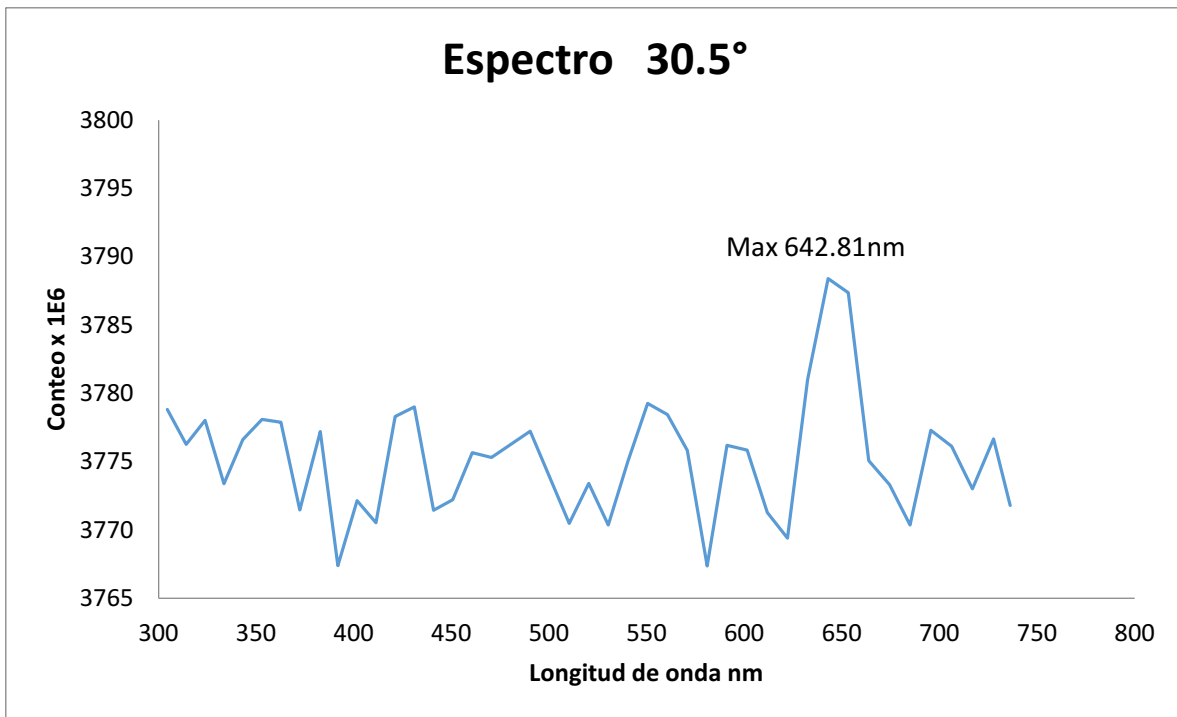


Figura 42. Espectro observado a 30.5°.

Para validar la longitud de onda de reconstrucción encontrada para el ángulo de registro, se midió con el microscopio electrónico la separación  $d$ , entre las franjas (Figura 43), obteniéndose un valor de 1.1  $\mu\text{m}$ . De acuerdo a los parámetros correspondientes de registro (ver Tabla 2) se esperaba una separación de 1.16  $\mu\text{m}$ , lo cual representa un error del 5.4%.

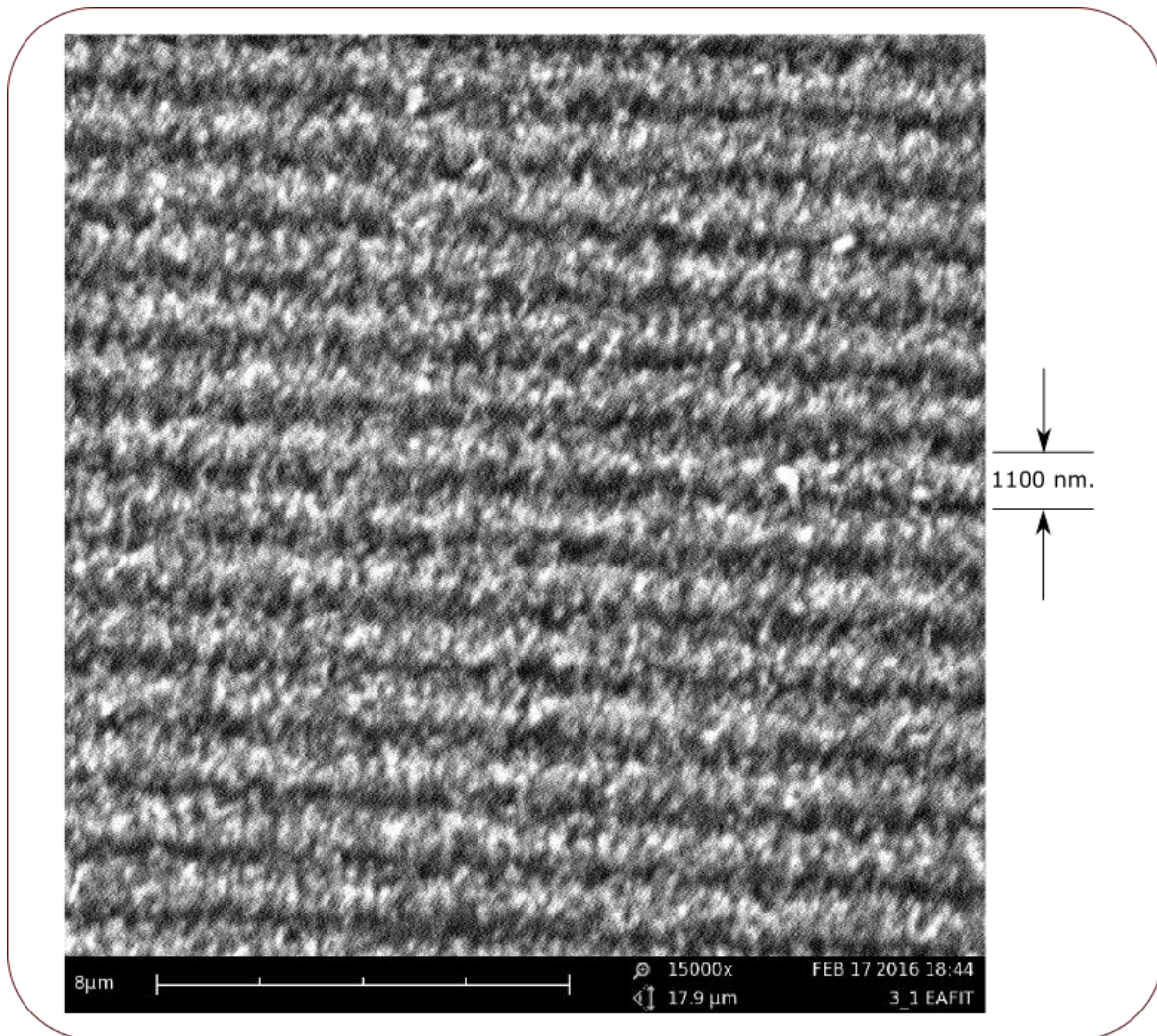


Figura 43. Imagen obtenida en el SEM a 15000X

Variable	Valor Esperado	Valor obtenido	% Error
Ángulo de reconstrucción	30°	29.5°	1.6%
Separación de Franjas	1.16μm	1.1μm	5.4%

Tabla 6. Relación de resultados esperados vs resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 6, se consideran apropiados para las tolerancias requeridas en la aplicación de hologramas de seguridad desde el punto de vista óptico, sin embargo al analizar el detalle de los puntos registrados, se puede observar una reconstrucción no homogénea,

un tamaño de holopíxel muy grande, no apto para la aplicación deseada y la presencia de puntos oscuros que no logran difractar la luz. Desde el punto de vista mecánico, este sistema requiere de gran complejidad si se desea poder compensar la posición del holopíxel en el holograma, variando su ángulo de inclinación  $\Phi$ , lo cual exige que toda la óptica, esto es el beam splitter y el espejo, roten sobre el eje del haz, manteniendo su alineación (Figura 36). Adicionalmente, el cambio en la separación espacial  $d$ , requiere modificar la distancia entre el beam splitter y el espejo, además de variar el ángulo de este para lograr que los haces coincidan en el mismo punto sobre la placa de registro, dando gran complejidad a todo el sistema y exigiendo gran precisión de los componentes y los sistemas de control.

## 5.2 Modelo Opto Electrónico

### 5.2.1 Montaje

Se implementó un montaje como el mostrado en la Figura 44

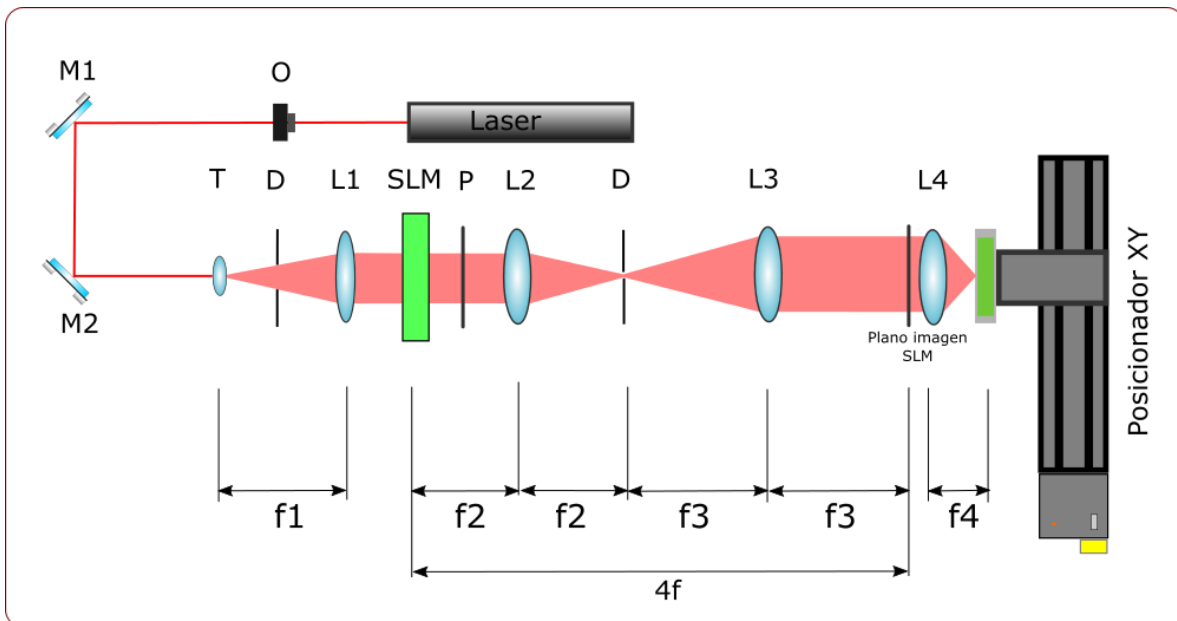


Figura 44. Detalle del montaje para la evaluación del modelo Opto electrónico.

El montaje óptico inicia con un lente expansor (T) (40X, 0.65) que abre el rayo, es limitado luego por el diafragma (D) pasando por una lente L1 de foco  $f_1 = 140$  mm colimando el haz para entrar al modulador espacial (SLM) Holoeye de 1024x 768 píxeles y resolución de  $36 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , luego de

este está dispuesto un polarizador (P) necesario para la formación de imagen a la salida del SLM. El sistema pasa por un sistema 4f [41] que permite filtrar las frecuencias altas producidas por el pixelado del modulador. Conformado por dos lentes L2 de foco  $f_2 = 85$  mm y L3 de foco  $f_3 = 205$  mm y un diafragma ubicado en el plano de Fourier, dispuesto con el objeto de filtrar los órdenes superiores y dejar solo el orden cero de la imagen del modulador espacial. La imagen filtrada es finalmente enfocada en una lente L4 de escritura con una distancia focal  $f_4 = 30$  mm la cual se encarga de converger los haces para lograr que interfieran en la placa de registro la cual está ubicada en una mesa XY con longitud de desplazamiento de 300 mm y precisión en el desplazamiento de  $2\mu\text{m}$  de acuerdo al principio ilustrado en la Figura 29. La fuente de luz usada es un láser de He Ne de 633 nm.

### 5.2.2 Parámetros de ensayos

Se realizan registros de cuadrados de  $15 \times 15$  holopixeles buscando que reconstruyan diferentes longitudes de onda con los parámetros mostrados en la tabla 7.

Ángulo incidencia luz de reconstrucción	$\Theta$	30	grados
$\lambda$ de laser de registro	$\lambda_r$	633	nm
$\lambda$ deseada de reconstrucción	$\lambda_o$	470 535 590 630	nm
z observador	z	500	mm
Magnificación		2.4	
Tamaño pixel en SLM		36	$\mu\text{m}$

Tabla 7. Variables de registro para ensayo.

El registro se programó de acuerdo al patrón mostrado en la Figura 45 de cuatro cuadrados con longitudes de onda deseadas de reconstrucción de 470nm, 535nm, 590nm, 630nm respectivamente.

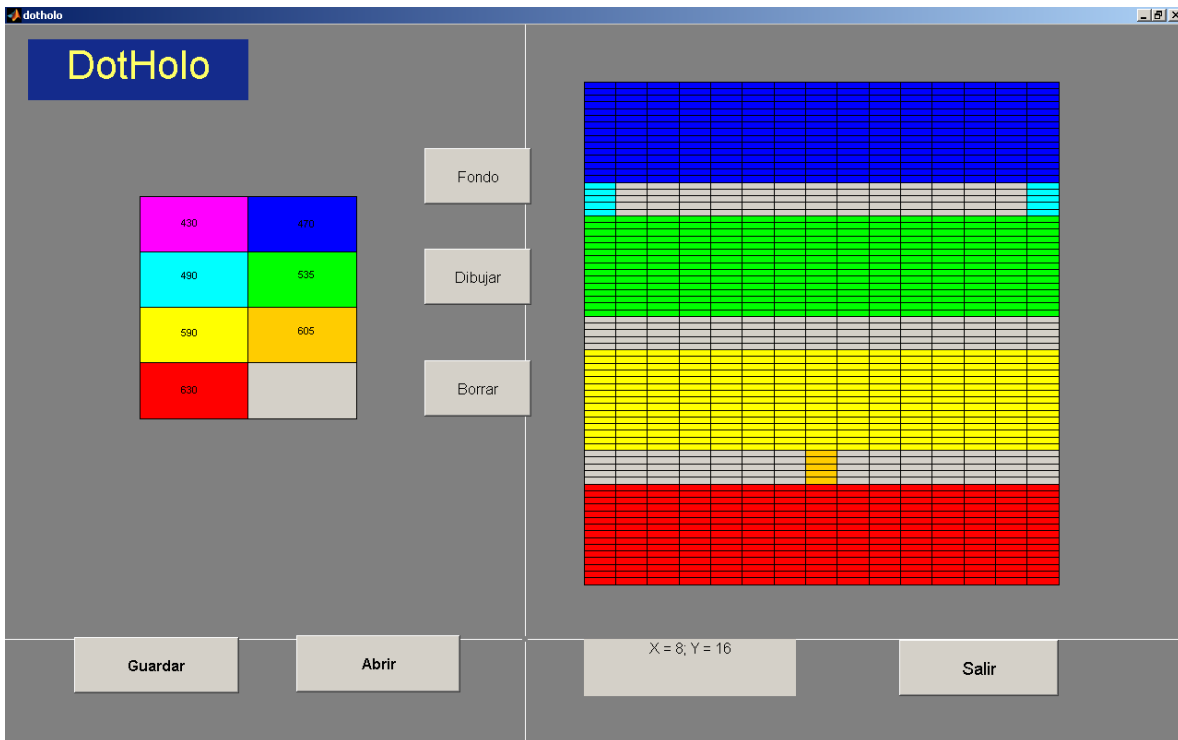


Figura 45. Parámetros de figura a registrar.

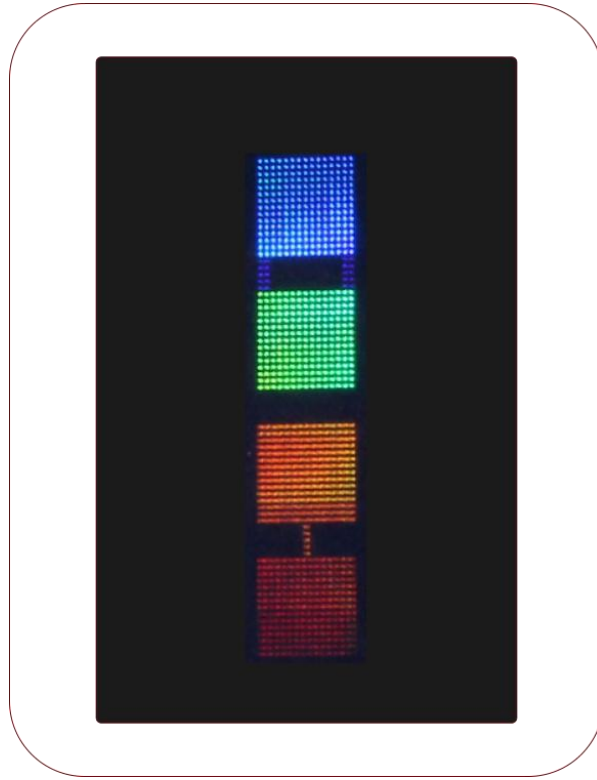
Los parámetros de registro se establecieron así:

Separación x entre holopixeles		0.15	mm
Separación y entre holopixeles		0.15	mm
Tiempo exposición		0.6	s
Placa de registro		PFG01	
Intensidad ( $I_{total}$ )		0.12	$\mu\text{W}$
Intensidad/ área $I=P/A$		1527.88	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Exposición del fabricante		916.7	$\mu\text{J}/\text{cm}^2$

Tabla 8. Parámetros de registro y revelado.

### 5.2.3 Resultados

En la Figura 46 se muestra la imagen general del registro obtenida al ser iluminado con un haz de luz blanca a  $30^\circ$ .



*Figura 46. Imagen del registro de cuadrados de longitudes de onda (de arriba abajo) 470nm, 535nm, 590nm, 630nm.*

La Figura 47 presenta el detalle al microscopio óptico de cada uno de los cuadrados y los pixeles que lo componen, mostrándose en la columna de la izquierda con iluminación frontal que no presenta difracción y en la derecha con la iluminación correspondiente ( $30^\circ$ ) para difractar la longitud de onda esperada, se observa una desviación de la superposición esperada de los puntos, la cual se puede atribuir a posibles defectos causados por la óptica utilizada, debido a que no se tenían elementos no corregidos y por lo tanto presentan aberraciones.

La mayor superposición y eficiencia se encuentra en el color azul (470 nm), el cual fue la longitud de onda que se tomó como base para la alineación de la convergencia de los haces.

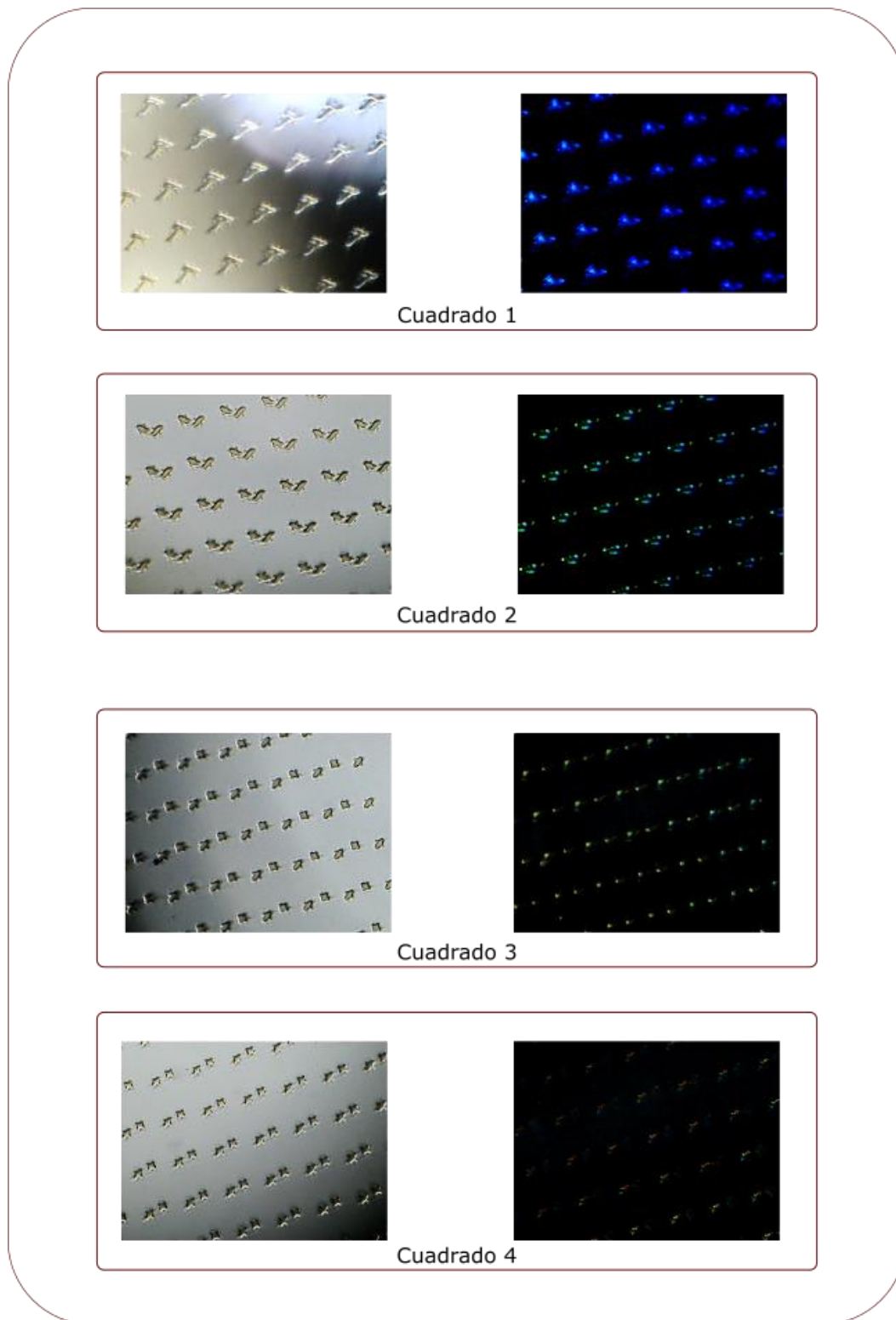


Figura 47. Detalle de los holopixel registrados para cada cuadrado con iluminación frontal a la izquierda e iluminación a 30° a la derecha.

Para cada registro se midió el espectro de reconstrucción correspondiente cuando se ilumina con un haz de luz blanca a 30°. (Figura 48 a 51).

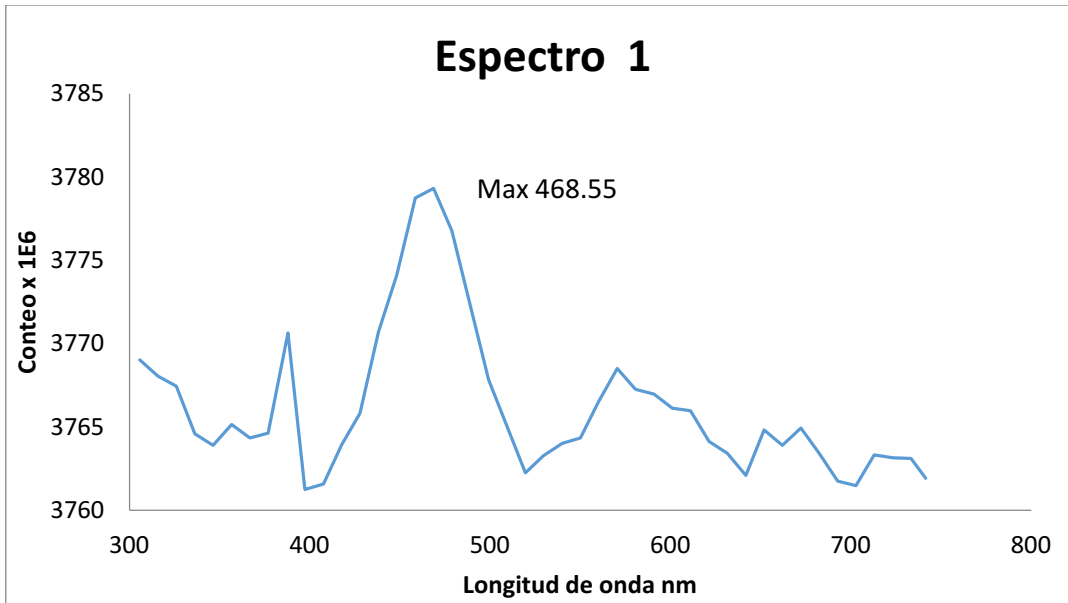


Figura 48. Espectro cuadrado 1 Azul.

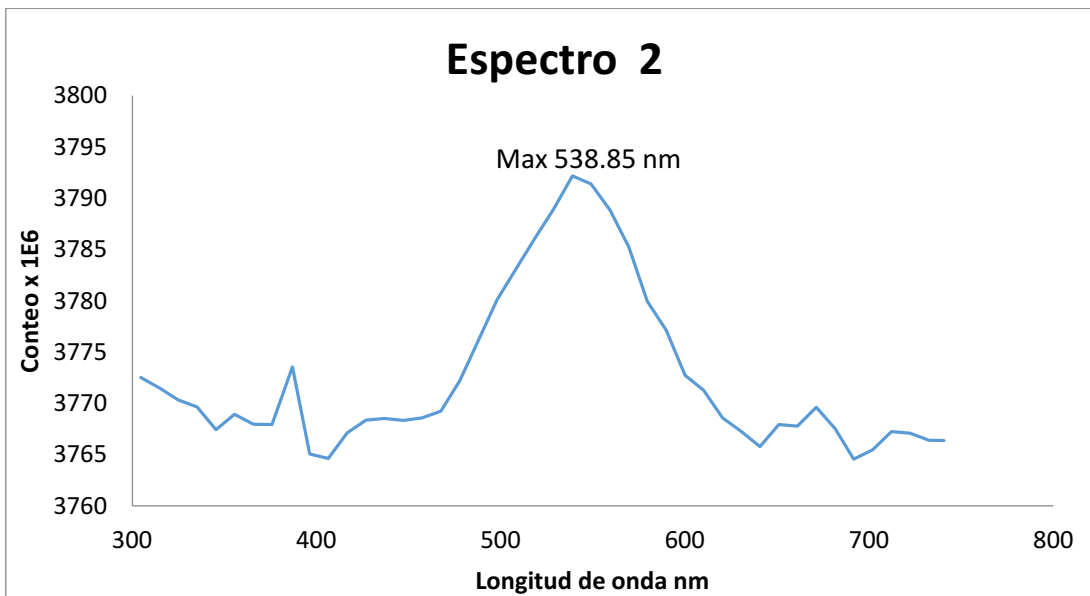


Figura 49. Espectro del cuadrado 2 Verde.

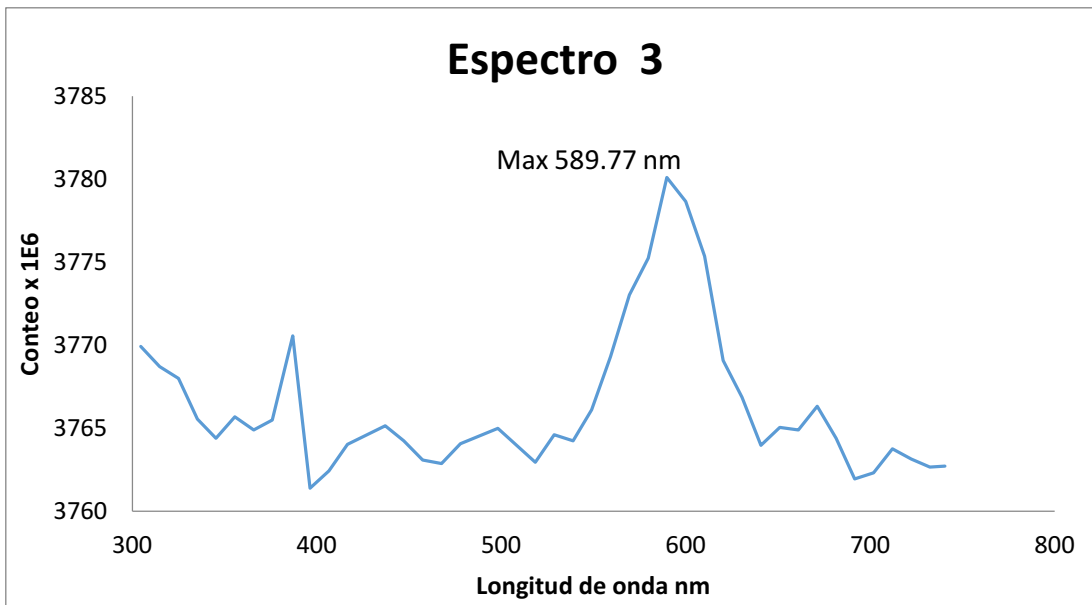


Figura 50. Espectro del cuadrado 3 Amarillo.

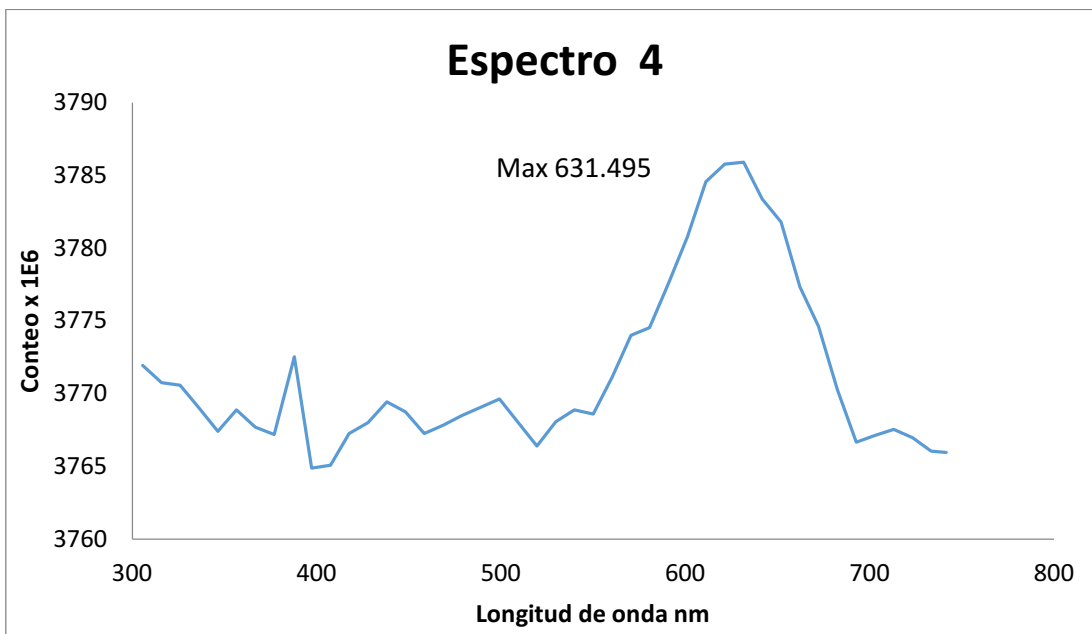


Figura 51. Espectro del cuadrado 4 Rojo.

Este arreglo experimental presenta un muy buen comportamiento óptico de los resultados esperados al compararlos con los resultados obtenidos, en la Tabla 9 se resumen el resultado del ensayo y los errores obtenidos, observándose desviaciones mínimas.

$\lambda$ deseada nm	$\lambda$ medida nm	error
470	468.55	0.31%
535	538.85	0.72%
590	589.77	0.04%
630	631.49	0.24%

*Tabla 9. Comparación de longitudes de onda esperados vs obtenidos.*

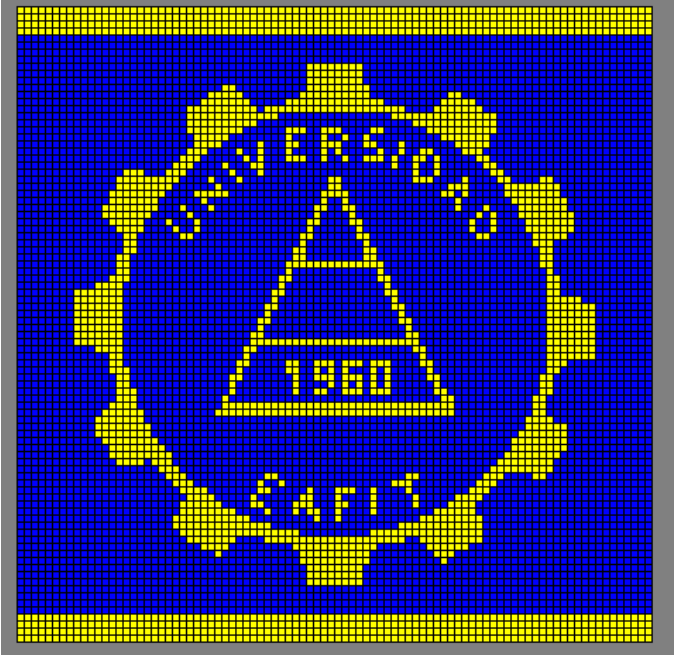
El arreglo experimental montado para esta evaluación mostró buen comportamiento y confiabilidad en el sistema de control, el posicionamiento, la obturación y generación de los holopixeles, como se aprecia en las Figura 46 y Figura 47; la distancia entre los puntos es muy homogénea, dentro de cada cuadrado el comportamiento óptico y el tamaño de los holopixeles presenta muy poca variación y no se observan holopixeles apagados.

El registro realizado también involucró muchos más holopixeles (4 cuadrados de 15 x 15), siendo una prueba más exigente para todo el comportamiento del sistema de control y cálculo, mostrando un desempeño muy eficiente.

El análisis de los resultados obtenidos con ambas configuraciones experimentales muestra una mayor factibilidad tecnológica del segundo arreglo, a pesar de tener ambas buenos comportamientos ópticos, medidos como desviación de los espectros esperados y los obtenidos; los sistemas de control y posicionamiento para la formación del arreglo espacial entre los haces, necesario para la generación de los holopixeles, muestran mucho mejor desempeño en el modelo opto electrónico. Estos resultados permiten escalar la evaluación a registros de mayor complejidad, simulando aplicaciones reales, utilizando para ello el arreglo experimental diseñado para evaluar dicho modelo.

## 6. Aplicaciones.

Con base en los resultados obtenidos se realizaron varios experimentos de registro, usando la configuración basada en principios opto electrónicos, simulando aplicaciones prácticas de hologramas de seguridad usando los logos de la universidad EAFIT y de la empresa C I ARclad S.A. En la Tabla 10 se presentan los diferentes ensayos programados.

Escudo EAFIT	90x90 dots		Sin Efecto cinético, registro de dos longitudes de onda diferenciadas
--------------	------------	---	---

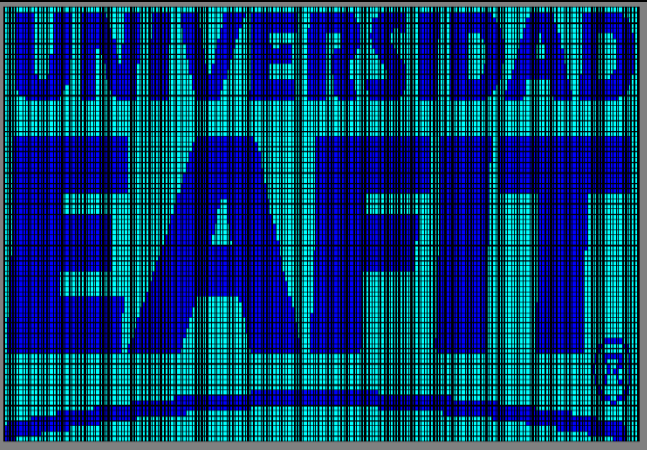
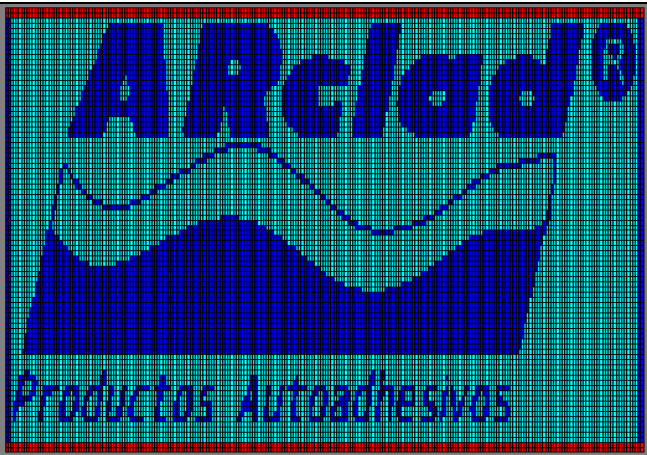
Logo Eafit	84x205 dots		Visualiza fondo y logo en diferente ángulo
Logo Arclad	86x235 dots		Visualiza fondo y logo en diferente ángulo

Tabla 10. Diseño de aplicaciones en logos.

El primer ensayo es un registro cuadrado de 8100 pixeles (90 x90) a dos colores, azul 470 nm y amarillo en los 590 nm, no se programan efectos cinéticos, la separación entre pixeles es de 0.15 mm, en un registro cuadrado de 13.5 mm de lado. El tiempo de registro requerido fue de 10 horas 7 minutos. Se busca con este ensayo probar la estabilidad del software y el sistema en general y comenzar a probar la capacidad del sistema para registrar elementos más complejos.

Para el segundo y tercer ensayo se programan registros más grandes, el segundo es el logo de la Universidad EAFIT con 17220 pixeles (84x205), en un diseño rectangular de 10.9 x 26.6 mm, con un tiempo de registro de 21 horas 32 minutos. El tercero corresponde al logo de C I ARclad S.A de 20120 pixeles (86 x 235), también en diseño rectangular de 11.2 x 30.5 mm.; el tiempo de registro fue 25 horas 16 minutos. En estos dos logos se programan con efecto cinético sobre el logo y fondo, buscando dos canales desfasados en movimiento angular, para presentar el logo en azul 470 nm y al

girar el registro ver el fondo en azul celeste en los 490 nm, un efecto muy usual para los logos en etiquetas de seguridad.

La Figura 52 muestra el resultado experimental correspondiente al primer ensayo ( Escudo de Universidad EAFIT) donde se ve una buena diferenciación de los colores programados, igualmente se logra una muy buena nitidez y brillo de los elementos del dibujo respecto al fondo. En cuanto al registro se aprecia una buena resolución de los pixeles y muy buena precisión en la ubicación de cada uno de los pixeles registrados, de otro lado el sistema probó ser confiable para registros de larga duración.



*Figura 52. Ensayo del escudo de UNIVERSIDAD EAFIT.*

La Figura 53 presenta el segundo ensayo. En éste se ve claramente la presencia de los dos canales, en el primero se visualiza el logo en azul y el fondo oscuro, y al rotar se aprecia que se oscurece la luz del logo dando paso a un azul verdoso del fondo del registro.



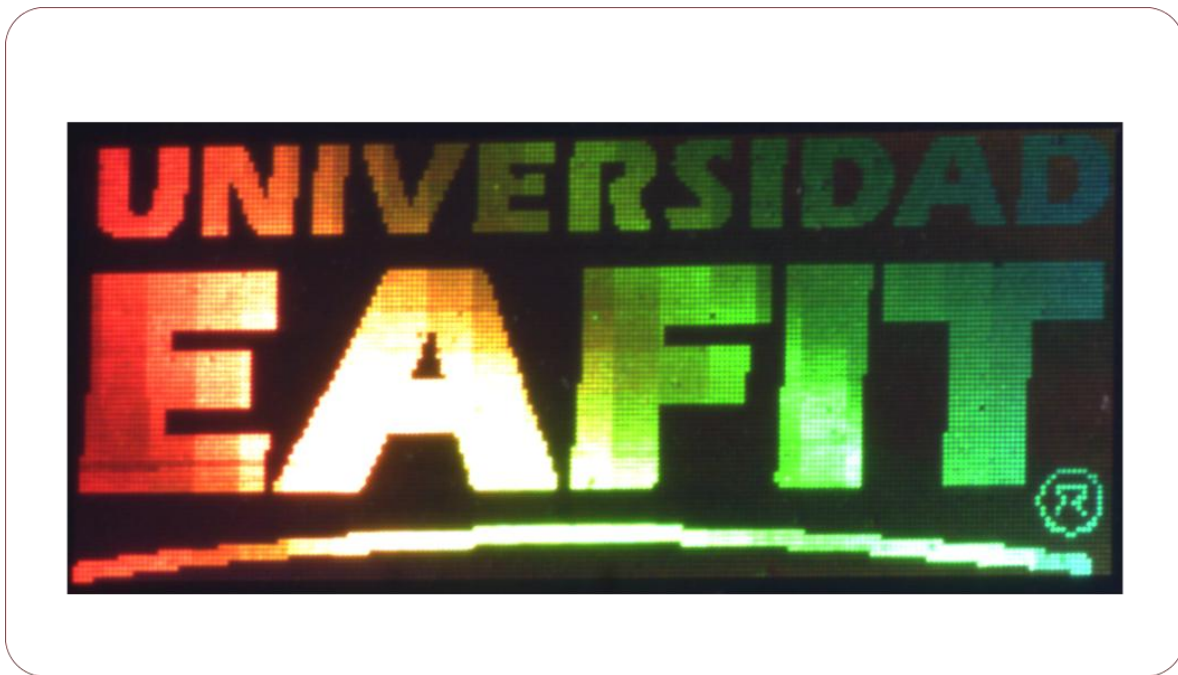
Visualización de logo



Visualización de fondo

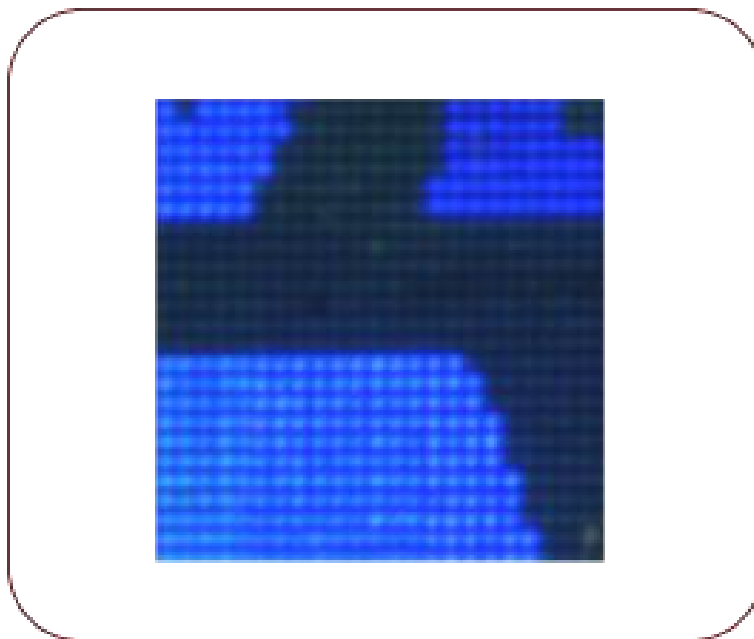
*Figura 53. Efecto fondo logo en logo EAFIT cuando es observado desde diferentes ángulos.*

En la Figura 54 se presenta el efecto óptico variable que se busca en los elementos de seguridad, el cual es una coloración en arco iris al tener un elemento suficientemente grande, en este caso más de 25 mm, para el cual un observador puede observar varios colores del espectro en el mismo logo variando según su ubicación y el ángulo de iluminación.



*Figura 54. Logo EAFIT, variando la posición de observación.*

En la Figura 55 se presenta el detalle de los pixeles “encendidos y apagados”, además se puede apreciar la capacidad del sistema para lograr una buena precisión y repetitibilidad en el posicionamiento para el registro de cada rejilla de difracción



*Figura 55. Detalle de los canales de rejillas encendidas y apagadas.*

En la Figura 56 se presentan los resultados del tercer ensayo, en éste se registró el logo de CI ARclad S.A. mostrando también una muy buena definición de los artes, muy buen contraste del fondo y el logo, en un efecto de doble canal, variando el ángulo de observación



*Figura 56. Efecto fondo o logo en logo ARclad cuando es observado desde diferentes ángulos.*

Además de los buenos resultados obtenidos en el registro de efectos ópticos, se puede apreciar en estos tres ensayos, un muy buen desempeño del sistema en su capacidad para registrar gran cantidad de holopixeles.

Se observa muy buena repetitividad en el posicionamiento y el tamaño del holopixel, dando imágenes sin presencia de pixeles apagados y con excelente homogeneidad.

## 7. Conclusiones y Trabajo Futuro

### 7.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se realizó una investigación encaminada a evaluar la factibilidad de desarrollar sistemas de registro de dispositivos difractivos de imagen ópticamente variable (DDIOV), en los cuales se fundamentan los hologramas de matriz de punto usados en las artes gráficas con el objetivo de brindar elementos de difícil replicación que cumplan la función de dar seguridad y diferenciación a los productos y determinar los aspectos primordiales de su factibilidad tecnológica.

Se realizó una revisión del estado del arte de los elementos de seguridad usados en la industria de las artes gráficas, mostrando como los hologramas y específicamente los hologramas de matriz de punto son una excelente alternativa a las exigencias de seguridad en los empaques-

Se analizó el modelo óptico que soporta los diferentes arreglos experimentales que son utilizados para la generación y registro de los elementos difractivos, estableciendo las ecuaciones que permiten calcularlos en función del color, el efecto deseado y los parámetros de iluminación y posición del observador.

A partir de la revisión general del proceso de fabricación y replicación masiva por método repujado usado en la actualidad, y haciendo especial énfasis en los dispositivos y configuraciones ópticas usadas para la generación y registro de las rejillas de difracción y los micro pixeles, se definieron los arreglos experimentales necesarios para el desarrollo del sistema de registro a implementar. Se presentan en detalle las dos configuraciones escogidas para la generación y registro de los hologramas de matriz de punto.

Tanto para el sistema completamente óptico, basado en beam splitter (BS) y espejos, como para el sistema opto electrónico basado en un modulador espacial (SLM), se desarrollaron los elementos funcionales y el software para el manejo de los algoritmos necesarios para el dibujo de los elementos a registrar, el tratamiento de imágenes, el cálculo de los parámetros de las rejillas, y el control de los dispositivos mecánicos de posicionamiento y obturación.

Para esto se desarrollaron e implementaron tres grupos de programas que posibilitan la calibración del sistema, el diseño y dibujo de las imágenes que se desean registrar, y el software de control para el sistema opto-digital para el registro del holograma. Por las pruebas realizadas se encontró que los programas desarrollados satisfacen plenamente los requerimientos y además brindan la posibilidad de ampliar su alcance y uso para proyectos de análogos de registro de sistemas de pixeles.

A partir de los resultados obtenidos en los dos sistemas evaluados, se puede concluir que ambos sistemas son factibles para la generación de hologramas basados en matriz de puntos. En ambos casos se pudo determinar, a partir de la medición de los espectros, que la longitud de onda de reconstrucción esta dentro del rango esperado. Esto teniendo en cuenta que para un observador las diferencias de longitud de onda se traducen en cambios de la tonalidad del color, lo cual no afecta el resultado esperado.

A la luz de una posible implementación industrial se encontró en el sistema óptico una menor complejidad y exigencia desde el punto de vista de los componentes ópticos, pero una gran complejidad para la implementación mecánica pues este sistema exige que la óptica este sometida a desplazamientos angulares, requiriendo mucha precisión y repetitividad, dando además mayores tiempos para el registro, el cual es un factor fundamental en hologramas de seguridad que están compuestos por varios miles de rejillas.

El sistema opto electrónico, exige mucho más de la óptica la cual debe ser de alta calidad, altamente corregida, para poder lograr el enfoque, preciso, confiable y repetible, sin embargo, posee la gran ventaja de no poseer elementos móviles lo cual facilita su implementación y permitiría tiempos de registro menores comparados con los sistemas puramente ópticos.

Después de haber demostrado su capacidad para la generación de hologramas de puntos y la buena concordancia con los resultados esperados se realizaron tres ejemplos de aplicaciones típicas de seguridad usando los logos de la Universidad EAFIT y C.I. ARclad S.A. dando muy buen registro y nitidez además de probar un efecto de doble canal con un funcionamiento satisfactorio.

## 7.2 Trabajo Futuro

Este trabajo sienta bases para seguir investigando en el registro de hologramas de seguridad. Cada uno de los sistemas planteados presenta retos para su posterior investigación.

En la generación y registro:

- El sistema óptico a la luz de una implementación requiere estudio y perfeccionamiento de los sistemas de posicionamiento de la placa, posicionamiento y control del ángulo de registro, para lograr correcciones en la inclinación de la rejilla dependiendo de la posición de la misma en el holograma.
- En el sistema opto electrónico es posible continuar investigando otros modelos para la generación de la rejilla tales como escritura directa o difracción usando los órdenes +1 y -1. También es posible trabajar con el sistema existente con óptica más especializada, además de correcciones para lograr una mejor superposición de los puntos y por ende mejores eficiencias.
- Es importante desarrollar en ambos sistemas un método para controlar el tamaño del punto y lograr reducir los píxeles para incrementar la resolución y por ende la calidad de las imágenes logradas. Controlando el tamaño del punto es posible manejar efectos de mayor o menor intensidad generando mayor cantidad de efectos visuales.

En el software:

- Desarrollar interfaces para procesar imágenes y efectos visuales que sean posibles de simular en tiempo real, de manera que se pueda tener una idea clara del registro final antes de su procesamiento.
- Es posible registrar píxeles de varias imágenes en varios canales sintonizados para verlas cada una en un ojo diferente creando de esta forma estereogramas, los principios desarrollados en esta tesis podrían ser usados con algoritmos de cálculo para lograr estos efectos.
- Perfeccionar el software actual de manera que se puedan manejar desde la interface más parámetros relativos a los montajes, sin requerir intervenir el código.
- Optimizar variables de registro y velocidades para reducir las velocidades de procesamiento.

En la tecnología:

Es posible usando las sinergias que posee la universidad en desarrollo de procesos y equipos, desarrollar los procesos de manufactura subsecuentes hasta llegar a la generación de etiquetas, esto es procesos electro químicos, electro plateado y repujado de las matrices con las rejillas de difracción sobre materiales plásticos.

# Bibliografía

- [1] R. L. v. Renesse, "Security aspects of commercially available dot matrix and image matrix origination systems," in *SPIE International Conference on Optical Holography and its Applications*, Kiev, Ukraina, 2004.
- [2] M. Andrulėvicius, T. Tamulevicius y S. Tamulevicius, «Formation and Analysis of Dot-matrix Holograms,» *Materials Science (Medziagotyra)*, vol. 13, n° 4, pp. 278-281, 2007.
- [3] F. Davis, "Holographic Image Conversion Method for making a Controlled Holographic Grating". USA Patent US 5262879, 10 July 1988.
- [4] A. Bulanovs, «Digital Holographic Recording in Amorphous Chalcogenide Films,» de *Recording materials and applications*, Daugavpils, InTech, 2011, pp. 71-93.
- [5] R. A. Lee, «Micromanufacturing for Document Security: Optical Variable Devices,» de *Micromanufacturing and Nanotechnology*, Berlin, Springer-Verlag Berlin , 2006, pp. 131-166.
- [6] A. Rhody y F. Ross, *Holography Marketplace*, Berkeley: Ross Books, 1999.
- [7] M. Skeren, P. Fiala y I. Ritcher, «Synthetic diffractive elements for security applications realized on an enhanced integral dot matrix system,» *Applied Optics*, vol. 45, n° 1, pp. 27-32, 206.
- [8] G. Ackermann and J. Eichler, *Holography A Practical Approach*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2007, pp. 229-236.

- [9] A. Y. Benbasat, *A survey of current optical security techniques*, Boston, MA.: MIT Media Lab, 1999.
- [10] B. Andrejs, "Principles of recording image matrix holographic stereogram," Daugavpils University, Daugavpils, Latvia, 2009.
- [11] R. L. v. Renese, "Ordering the Order," in *SPIE conference on practical Holography IX.*, San José, California, 1995.
- [12] S. L. Yeh, «Using random features of dot matrix holograms for anticounterfeiting,» *Applied Optics*, vol. 45, n° 16, pp. 3698-3703, 2006.
- [13] R. D. Hersch y S. Chosson, «Band Moiré Images,» *ACM Trans. on Graphics*, vol. 23, n° 3, pp. 239-248, 2004.
- [14] I. Amidror, *The theory of the Moiré phenomenon*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [15] V. Cadarso, S. Chosson, K. Sidler, R. Hersch y J. Brugger, «High Resolution 1D moirés as counterfeit security features,» *Light: Science and Applications*, vol. 2, pp. 1-5, 2013.
- [16] R. L. v. Renesse, «A review of Holograms and other Microstructures as Security Features,» de *Holography, the first 50 years*, The Hague, Springer Verlag, 1999, pp. 1-9.
- [17] C. Bishop, «Vacuum-coated products aid anti-counterfeiting measures,» *Converting quarterly*, vol. 2, n° 4, pp. 57-60, 2012.
- [18] HOLOMEX, *Catalog Security patterns*, Mexico DF, 2015.
- [19] H. I. Ltd, *Catalogo Productos Holostik*, New Delhi: Holostik.
- [20] F. Inteligentes, *Catálogo Holograma una protección inteligente*, Monterrey, México, 2012.
- [21] C. I. Hologramas, *Catalogo de Productos C I Hologramas*, Bogotá Colombia, 2015.
- [22] A. Bulanovs y S. Gerbrederes, «Advanced concept for creation of security holograms,» *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, n° 6, pp. 61-69, 2013.
- [23] R. L. v. Renesse, «Synergistic combination of document security techniques,» *Proc. SPIE*

- 3973, vol. 3973, pp. 91-103, 2000.
- [24] Spacialimagingtech, «Sitech,» 11 01 1998. [En línea]. Available: <http://www.sitech.co.uk>.
- [25] Holoprint, «Holoprint security solutions,» [En línea]. Available: <http://www.holoprint.ae>.
- [26] D. Pizzanelli, «The development of direct write digital holography,» de *Holography, Art and Design*, London, 2002.
- [27] B. Zarkov, D. Grujic y D. Pantelic, «High Resolution dot matrix hologram generation,» *Physica Scripta IOP Publishing*, pp. 1-3, 2012.
- [28] T. Sandström, P. Askebjør, J. Sallander, R. Zerneck y A. Karawajczyk, «Pattern Generation with SLM Imaging,» *Proc. of SPIE*, vol. 4562, pp. 36-44, 2002.
- [29] A. Bulanovs, E. Tamanis y I. Mihailova, «Holographic recording device based on LCoS Spatial light modulator,» *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, n° 5, pp. 60-67, 2011.
- [30] A. Firsov, A. Firsov, B. Loechel, A. Erko, A. Svintsov y S. Zaitsev, «Fabrication of digital rainbow holograms and 3-D imaging using SEM based e-beam lithography,» *Optics express OSA*, vol. 22, n° 23, 2014.
- [31] A. Bulanovs, V. Gerbrederis, G. Kirilovs y J. Teteris, «Investigations of As-S-Se thin films for use as inorganic photoresist for digital image matrix holography,» *central European Journal of Physics*, vol. 5, n° 9, pp. 1327-1331, 2011.
- [32] A. Poleshchuk, A. Kutanov, V. P. Bessmeltsev, V. P. Kolkov, R. V. Shimanskii, A. I. Malyshev, A. E. Matochkin, R. V. Goloshevskii, K. V. Makarov, V. P. Makarov, I. A. Snimshchikov y N. Sydyk uulu, «Microstructuring of Optical Surfaces: Technology and Device for Direct Laser Writing of Diffractive Structures,» *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, vol. 46, n° 2, pp. 171-180, 2010.
- [33] M. Skeren, J. Svoboda y P. Fiala, «Advanced matrix laser lithography for fabrication of photonic micro structures,» *Journal European Optic Society*, vol. 7, 2012.
- [34] H. Kang, E. Stoykova, J. Park, S. Hong y Y. Kim, «Holographic printing of White Light Viewable Holograms and Sterograms,» de *Holography - Basic principles and contemporary*

- applications*, Intech Open Science, 2013, pp. 171-201.
- [35] M. Skern, J. Svoboda, M. Kveton y P. Fiala, «Fabrication of diffractive elements using matrix laser lithography,» *EPJ Web of Conferences*, nº 48, pp. 1-5, 2013.
- [36] Y. LI, T. WANG, S. YANG y S. ZHANG, «Theoretical and experimental study of dot matrix hologram,» *Proceedings SPIE*, vol. 3559, pp. 121-129, 1998.
- [37] A. Bulanovs, V. Gerbreders y V. Paskevics, «Principles of creation and reconstruction of dot matrix holograms,» *Latvian journal of physics and technical sciences*, nº 2, pp. 44-51, 2008.
- [38] C. K. Lee, J. Wu, S. L. Yeh, C.-W. Tu, Y.-A. Han, E. H. Liao, L. Y. Chang, C. Tsai, H.-H. Lin, J. Hsieh y T. Lee, «Optical configuration and color representation range of variable pitch dot matrix holographic printer,» *Applied Optics*, vol. 39, nº 1, pp. 40-53, 2000.
- [39] T. Tamulevicius, S. Tamulevicius, M. Andrulevicius, A. Guobiene, L. Poudziukynas, G. Janusas y E. Griskonis, «Formation OVD using laser interference lithography,» *Materials Science*, vol. 13, nº 3, pp. 183-187, 2007.
- [40] P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge.
- [41] E. Hecht, *Óptica*, Madrid: Pearson Addison Wesley, 2000.
- [42] D. Malacara, *Óptica Básica*, México: Fondo de Cultura Económica, 2004.
- [43] J. Svoboda, M. Skeren y P. Fiala, «Synthetic Image Holograms,» de *Advanced Holography - Metrology and Imaging*, InTech, 2011, pp. 209-232.
- [44] M. Skeren, M. Nyvlt y J. Svoboda, «Design and visualization of synthetic olograms for security applications,» de *9th International Symposium of Display Holography ISDH 2012*, Cambridge, USA, 2012.
- [45] Mathworks, *Matlab the language of technical computing*, Natick MA: The Mathworks, 2000.
- [46] A. Cavallo, R. Setola y F. Vasca, *Using Matlab, Simulink and Control System Toolbox*, Hertfordshire, GB: Prentice Hall, 1996.
- [47] W. Wang, *Using Thorlabs APT ActiveX Control in Matlab*, THORLABS, 2011.

- [48] P. Marchand y T. Holland, Graphics and GUIs with Matlab, Boca Raton, Florida: Chapman & Hall, 2002.
- [49] S. H. H. Company, «hologram\_master.htm,» [En línea]. Available: <http://hlhologram.com>.
- [50] G. Ackermann y J. Eichler, Holography, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007.