

**Desarrollo e implementación óptica y  
computacional para la generación de hologramas  
sintéticos de imágenes 3D reales**

**Alejandro Madrid Sánchez**

**Asesor:**

**Msc. Daniel Velásquez Prieto**

Tesis de maestría presentada como requisito parcial para optar

al título de Magister en Física Aplicada

Grupo de Óptica Aplicada

Departamento de Ciencias Físicas

Universidad EAFIT

Noviembre 2017

# Resumen

La estereoscopia holográfica como display 3D es una técnica que en la última década ha sido ampliamente desarrollada por diferentes grupos de investigación y empresas que han probado su alto impacto en aplicaciones como la ingeniería, medicina, museografía, publicidad, entre otros.

La síntesis de este tipo de hologramas requiere del conocimiento y dominio de la técnica de la estereoscopia holográfica para el desarrollo de holoimpresoras que permitan su registro de forma estable y eficiente y de la generación de información de profundidad y paralaje que satisfaga las condiciones de tres sistemas del modelo: el sistema de adquisición, de registro y de reconstrucción.

Estos tres sistemas, son analizados y entendidos desde los fundamentos de la estereoscopia holográfica, bases con las que fue posible diseñar e implementar un sistema ópto-mecánico y de control para la escritura de este tipo de hologramas, analizar, proponer e implementar algoritmos para generar las imágenes requeridas en su registro y finalmente, integrar los sistemas para la conformación de un prototipo de holoimpresora capaz de registrar estereogramas holográficos de paralaje completo que producen imágenes 3D virtuales, reales y plano imagen de objetos que pueden ser reales o generados en computador.

De esta forma, este trabajo describe inicialmente la estereoscopia holográfica dentro de un contexto de los diferentes displays 3D, para posteriormente analizar el modelo que lo fundamenta y así explicar la relación entre los sistemas de adquisición, registro y reconstrucción. Un análisis de la configuración de la holoimpresora es reportado y a partir de este es propuesto el diseño óptico realizado para obtener mejores estereogramas holográficos de paralaje completo.

Para la obtención de las imágenes requeridas para su registro, diferentes métodos computacionales son presentados y clasificados dependiendo de su configuración y el tipo de imagen 3D obtenida.

Finalmente, este trabajo reporta los resultados experimentales obtenidos, en los cuales son mostrados y discutidos diferentes reconstrucciones 3D obtenidas a partir de estereogramas holográficos de paralaje completo para objetos tanto reales como generados en computador.

*Para Daniel*

## **Agradecimientos**

Este trabajo es el producto de la contribución de muchas personas que me han formado, aconsejado, apoyado y motivado en el desarrollo y asimilación de estos conceptos, pero sobre todo en su transferencia. Quiero agradecer a mi Prof. Daniel Velásquez, a quien dedico este trabajo por su contribución en formación, consejos, apoyo, motivación y discusiones que hicieron posible materializar y registrar este conocimiento, a él muchas gracias por esta experiencia y etapa de largo tiempo.

A mi familia, amigos, compañeros, quienes creyeron en mis capacidades y que tuvieron que sacrificar algo de sus partes para que yo pudiera dedicarme en esta ardua tarea. Gracias en especial a mis padres, Henry y Marta. A Daniela Bolaños por su incansable e incondicional compañía. A mis colegas de laboratorio, Esteban, Isabel, Maria Josef y Danilo. A mis colegas Carlos y Camilo y al Prof. René por su apoyo y contribución en el diseño óptico y discusiones sobre el entendimiento del sistema. A mis amigos, Jamie y Ana María por su compañía y momentos de ocio.

También agradezco a la Universidad EAFIT por su apoyo en mis procesos formativos mediante la Beca de posgrado y sus espacios académicos y de investigación.

¡A todos gracias!

# Contenido

Resumen.....	II
Agradecimientos .....	IV
Contenido.....	V
Lista de figuras.....	VII
Lista de tablas.....	XI
Glosario y acrónimos .....	XII
1 Introducción .....	1
1.1 Sobre esta tesis: desarrollo óptico y computacional de una holoimpresora .....	8
2 Fundamentos de estereoscopia holográfica.....	12
2.1 Estereogramas holográficos (EH) .....	14
2.2 Registro de Estereogramas holográficos .....	15
2.3 Reconstrucción y exhibición tridimensional y de paralaje de un estereograma holográfico 17	
2.4 Generación de las imágenes para estereogramas holográficos.....	21
3 Diseño e implementación de una holoimpresora .....	22
3.1 Análisis de la configuración de la holoimpresora .....	23
3.1.1 Láser y obturador .....	24
3.1.2 Sistema electromecánico de desplazamiento.....	26
3.1.3 Interfaz de control y automatización.....	27
3.1.4 Haz referencia .....	29
3.1.5 Haz objeto y análisis sistema óptico de escritura .....	31

3.2	Diseño del sistema óptico de la holoimpresora .....	34
3.2.1	Optimización e implementación del sistema óptico.....	35
3.2.2	Evaluación experimental de la holoimpresora .....	39
4	Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos.....	40
4.1	Clasificación de los métodos para la generación de imágenes hogels .....	43
4.2	Métodos de punto de vista.....	46
4.2.1	Cámara simple.....	47
4.2.2	Cámara centrada.....	52
4.2.3	Rendimiento comparativo de los métodos de punto de vista .....	56
4.3	Métodos de apertura .....	57
4.3.1	Cámara truncada.....	58
4.3.2	Doble cámara truncada (holocámara).....	61
5	Resultados Experimentales .....	67
5.1	Evaluación experimental métodos de punto de vista .....	69
5.1.1	Cámara simple.....	69
5.1.2	Cámara centrada.....	76
5.2	Evaluación experimental métodos de apertura.....	83
5.2.1	Cámara truncada.....	83
5.2.2	Doble Cámara truncada .....	88
6	Conclusiones .....	95
7	Trabajos futuros.....	98
8	Referencias.....	100

# Lista de figuras

Fig. 1. Displays 3D estereoscópicos a partir de estéreo-canales basados en a) diferencia espectral, anaglifos, b) diferencia en polarización, display estereoscópico por polarización y c) diferencia temporal, display estereoscópico de multiplexado temporal, las vistas derecha e izquierda son presentadas de forma alternada y sincronizada con un obturador activo de cristal líquido que abre sucesivamente para un ojo mientras que ocluye el otro. Adaptado de [2]. ..... 3

Fig. 2. Un verdadero display 3D funciona como una ventana transparente del mundo real. a) un observador frente a una escena 3D real. b) un observador frente a un verdadero display 3D, el cual reproduce la direccionalidad de la luz emitida por una escena 3D. .... 4

Fig. 3. Clasificación general de los display 3D. Con gafas: sistemas estereoscópicos. Sin gafas: displays autoestereoscópicos, displays volumétricos y displays holográficos [7]...... 5

Fig. 4. Esquema de una configuración óptica para el registro de un holograma analógico. .... 6

Fig. 5. Métodos para la síntesis de hologramas: a) producir numéricamente el patrón de interferencia de pequeños hologramas y b) sintetizar un holograma a partir del registro óptico de una secuencia de imágenes 2D de una escena 3D..... 13

Fig. 6. Holoimpresora de escritura directa y paralaje completo propuesta por M. Yamaguchi, et. al. .... 15

Fig. 7. Registro de un EH de paralaje completo bajo una configuración óptica por escritura directa. .... 16

Fig. 8. Información presentada por un display 3D de paralaje..... 18

Fig. 9. Reconstrucción de un estereograma holográfico (EH). Relación entre LCD, sistema óptico de escritura y ventana de observación..... 19

Fig. 10. Modelo geométrico de reconstrucción de un EH-PC. Relación entre el campo visual de escritura y de visualización  $\theta$ , información de paralaje y resolución de la imagen 3D presentada por un EH. .... 20

Fig. 11. Etapas que componen una holoimpresora para la síntesis de hologramas. .... 23

Fig. 12. Esquema general de la configuración óptica de la holoimpresora implementado. ....	23
Fig. 13. Uso del obturador para el control de la exposición. a) operación del obturador, b) tiempo en que es expuesta la emulsión holográfica. ....	25
Fig. 14. Proceso de registro y desplazamiento de la placa holográfica. a) ciclo del desplazador XY, b) ciclo de obturación (t. expos: tiempo de exposición). ....	27
Fig. 15. Interfaz Estereoprinter 3.0 para el control y automatización de la holoimpresora. ....	28
Fig. 16. Configuración óptica del haz referencia. ....	29
Fig. 17. Configuración óptica del haz objeto. ....	31
Fig. 18. Sistema óptico L1 a L4 para la formación de la imagen de la apertura $A_o$ . ....	32
Fig. 19. Sistema óptico L2 a L4 en la formación de la imagen del LCD. ....	33
Fig. 20. Sistema óptico diseñado en este trabajo. En imagen se muestra un trazado de rayos realizado en Zemax para evaluar el sistema. De izquierda a derecha: plano LCD, sistema L2, sistema L3, sistema L4 y plano imagen LCD I4. ....	37
Fig. 21. Sistema óptico L4 diseñado en este trabajo para la escritura de hogels de campo visual amplio. El sistema está compuesto por 7 lentes que fueron optimizados con el software Zemax. ....	38
Fig. 22. LCD implementado para el nuevo sistema holoimpresora diseñado. Kit compuesto por LCD, dos polarizadores, cables y tarjetas de control. ....	38
Fig. 23. Registro de un holograma analógica plano imagen. a) registro holograma H1, b) Registro holograma H2 y c) reconstrucción holograma H2. ....	41
Fig. 24. Registro de un EH plano imagen a partir de una configuración de registro de dos pasos. a) Registro holograma H1, b) Registro holograma H2 y c) reconstrucción holograma final H2. ....	42
Fig. 25. Imagen 3D producida por un EH-PC con información de la escena 3D por fuera (imagen real) y por dentro (imagen virtual) del material de registro. ....	43
Fig. 26. Modelo simplificado de un EH-PC como display de paralaje. ....	44
Fig. 27. Generación de imágenes hogel basado en imágenes de perspectivas capturadas en los puntos de vista del observador. ....	45

Fig. 28. Generación de imágenes hogel basado en imágenes capturadas en cada apertura del EH. . 45

Fig. 29. Clasificación métodos para la generación de imágenes hogels. .... 46

Fig. 30. Configuración geométrica del método de cámara simple. .... 48

Fig. 31. Imagen perspectiva extendida obtenida por la configuración de la cámara del método de cámara simple..... 49

Fig. 32. Imagen perspectiva recortada  $Ck, l$ , obtenida de la imagen perspectiva extendida  $Ck, lE$ . 50

Fig. 33. Transformación aplicada sobre el conjunto de imágenes perspectiva  $Ck, l$  para la generación del conjunto de imágenes hogel  $hi, j$  para un estereograma holográfico de solo paralaje horizontal. .... 51

Fig. 34. Selección de tres imágenes hogels obtenidas para una escena compuesto de un cubo y realizando el procedimiento descrito en esta sección para  $K = 108$  imágenes y  $L = 1$ . .... 51

Fig. 35. Configuración geométrica del método de cámara centrada. .... 53

Fig. 36. Remuestreo de pixeles para la obtención de imágenes hogel a partir de imágenes perspectivas bajo la configuración de cámara centrada, en ilustración procedimiento realizado para un conjunto de  $3 \times 3$  imágenes perspectivas cada una de resolución  $3 \times 3$  pixeles. .... 55

Fig. 37. Generación de imágenes hogels usando el método de cámara centrada. a) selección de imágenes perspectivas, b) selección de imágenes hogel. .... 56

Fig. 38. a) Modelo de una cámara truncada generada en computador, b) objeto proyectado sobre el plano cercano de la cámara truncada..... 59

Fig. 39. Configuración geométrica del método de cámara truncada. .... 60

Fig. 40. Propiedades de una cámara virtual convencional generada por softwares de computación gráfica. a) vectores de una cámara virtual, b) proyección de dos objetos de una escena en el plano de la cámara, c) oclusión para una cámara convencional y c) vectores que determinan la iluminación de un objeto..... 64

Fig. 41. Propiedades de una cámara pseudoscópica construida a partir de una cámara ortoscópica. 65

Fig. 42. Configuración del método de doble cámara truncada..... 66

Fig. 43. Modelo 3D utilizado para el registro del EH. ....	70
Fig. 44. a) imágenes perspectivas extendidas <b><i>Ck, IE</i></b> obtenidas bajo la configuración de cámara simple. b) imágenes perspectivas recortadas.....	72
Fig. 45. Imágenes hogels obtenidas bajo la transformación descrita en la sección 4.2.1.....	74
Fig. 46. Reconstrucción del EH-PH. ....	76
Fig. 47. Modelo 3D utilizado para el registro del EH-PC, tres fuentes de luz puntuales fueron utilizadas. ....	77
Fig. 48. Selección de imágenes perspectivas capturadas usando el método de cámara centrada, en total fueron capturadas 46.656 imágenes perspectivas. ....	78
Fig. 49. Imágenes hogel obtenidas a partir del método de cámara centrada. ....	80
Fig. 50. Reconstrucción del EH-PH obtenido. Fotografía de diferentes perspectivas del mismo holograma sintético. ....	82
Fig. 51. Selección del conjunto de imágenes hogels obtenidas por el método de cámara truncada..	85
Fig. 52. Reconstrucción EH-PC obtenido a partir del método de cámara truncada. ....	87
Fig. 53. Configuración de la cámara pseudoscópica en una escena 3D para generar imágenes 3D reales usando el método de doble cámara truncada. ....	89
Fig. 54. Selección del conjunto de imágenes hogel generadas por la cámara pseudoscópica implementada. ....	90
Fig. 55. Reconstrucción del EH-PH obtenido a partir de las imágenes hogels generadas por una cámara pseudoscópica. ....	91
Fig. 56. Modelo 3D generado en computador para el registro del holograma sintético plano imagen. ....	92
Fig. 57. Selección del conjunto de imágenes hogels generadas por el método de doble cámara truncada. ....	93
Fig. 58. Reconstrucción del EH-PC plano imagen.....	94

## Lista de tablas

Tabla 1. Relaciones físicas entre la calidad de la experiencia 3D generada por un EH y de las partes que componen una holopresora.....	21
Tabla 2. Descripción técnica obturador [46]......	25
Tabla 3. Especificaciones del dispositivo de traslación lineal LTS300 utilizado [47]......	26
Tabla 4. Detalles ópticos de las lentes simples utilizadas en la configuración del haz objeto. ....	34
Tabla 5. Propiedades de una cámara virtual truncada convencional.....	62
Tabla 6. Propiedades de una cámara truncada conjugada o pseudoscópica.....	63
Tabla 7. Parámetros de configuración de la cámara simple para la captura de las imágenes perspectiva. .....	72
Tabla 8. Parámetros de registro del EH-PC para el método de cámara simple.....	75
Tabla 9. Parámetros de captura imágenes de perspectivas método de cámara centrada. ....	79
Tabla 10. Parámetros de registro de EH-PC para el método de cámara centrada .....	81
Tabla 11. Parámetros de captura imágenes hogel usando el método de cámara truncada. ....	84
Tabla 12. Parámetros de registro EH-PC para el método de cámara truncada.....	86

# Glosario y acrónimos

Cámara Real	Dispositivo compuesto por lentes utilizado para capturar imágenes de una escena física
Cámara virtual	Modelo computacional basado en el modelo de cámara pinhole, con el que un conjunto de puntos de una geometría es llevado a una imagen 2D
Display 3D	Dispositivos de visualización que reproduce las apariencias visuales de una escena 3D
DMD	Dispositivo digital de micro espejos (del inglés Digital Micromirror Device)
EH	Estereograma holográfico
EH-PC	Estereograma holográfico de paralaje completo
EH-PH	Estereograma holográfico de paralaje solo horizontal
Estereopsis	Fenómeno visual a partir del cual el cerebro compone la tridimensionalidad usando dos imágenes ligeramente diferentes
FOV	Campo de visión. Utilizado para especificar el campo visual del estereograma holográfico o del objetivo de escritura
Hogel	Holograma elemental que compone un estereograma holográfico
Holoimpresora	Dispositivo opto-mecánico para la impresión de estereogramas holográficos
Imagen 3D	Imagen en dos dimensiones que simula las apariencias tridimensionales de una escena 3D

Plano imagen	Imagen 3D de una escena percibida por un observador tanto por dentro como por fuera del display
Imagen 3D real	Imagen 3D de una escena que parece provenir de afuera del display 3D.
Imagen 3D virtual	Imagen 3D de una escena que parece provenir de adentro del display 3D
Imagen hogel	Imagen 2D registrada en cada uno de los hogel que componen el estereograma holográfico
Imagen ortoscópica	Imagen 2D con las apariencias de una escena como es percibida por el ojo humano
Imagen perspectiva	Imagen 2D capturada por una cámara y que contiene información de la perspectiva de una escena 3D
Imagen pseudoscópica	Imagen 2D con las apariencias de profundidad invertidas en comparación con la imagen ortoscópica.
LCD	Acrónimo del inglés Liquid Cristal Display, pantalla de cristal líquido
Paralaje	Diferencia en la posición aparente de un objeto dentro de una escena 3D
Plano holograma	Plano del material de registro, en el que son registrados los hogels
SLM	Del inglés Spatial Light Modulator, modulador especial de luz



# 1 Introducción

Nuestra relación con el mundo físico se genera en una primera instancia a partir de nuestra percepción visual y nuestra capacidad para inferir información dimensional, permitiéndonos interactuar y entender la relación espacial de los objetos del mundo real. Esta capacidad visual fue entendida y demostrada por Charles Wheatstone en su artículo publicado en 1838 “Contributions to the physiology of vision. Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved phenomena of binocular vision”, en el que presenta su invención el estereoscopio, y a partir de este, estudió los efectos fisiológicos de la visión humana en la percepción de la profundidad y demostró por primera vez en la historia su conexión con la disparidad binocular de nuestro sistema visual [1].

Los experimentos de C. Wheatstone, constaban de dibujos trazados a mano en los que presentaba dos diferentes perspectivas de una misma figura geométrica y a partir de estas generaba la percepción binocular y de estereopsis usando como medio de visualización el estereoscopio [1]. Este dispositivo constaba de dos espejos planos puestos de tal forma que sus partes posteriores formaban un ángulo de  $90^\circ$  y permitía posicionar cada ojo en un único espejo, para visualizar por cada uno de estos un dibujo de una misma escena ligeramente diferentes [1].

Con la invención del estereoscopio se marcó el inicio del desarrollo de lo que se considera como el verdadero display<sup>1</sup> 3D [2][3], toda una empresa que promovida por los desarrollos científico, de las

---

<sup>1</sup> La palabra display, es una palabra del inglés y por tanto no es aceptada por la Real Academia Española. Esta tiene en su diccionario la palabra visualizador, sin embargo, la definición que plantea se limita a pantallas de visualización de aparatos electrónicos. Por el contrario “display” tiene un sentido mucho más amplio como medio de comunicación visual y es usado en este sentido como un sistema de exhibición visual que puede ser

industrias tecnológicas de entretenimiento, cine 3D, video juegos y por la computación gráfica 3D, han generado en diferentes momentos de la historia diversos tipos de tecnologías que no solo reproducen las señales fisiológicas de la visión humana, sino también las señales psicológicas, las cuales a partir de imágenes 2D son capaces de generar sensaciones de profundidad [2][4][5][6].

En la actualidad, existe un gran esfuerzo por desarrollar displays 3D que presenten a un observador información que imite las apariencias de los objetos o escenas del mundo físico de la manera más realista posible. Las tecnologías comúnmente usadas están basadas en los principios de Wheatstone, los cuales son sistemas estereoscópicos que a partir de un medio de exhibición 2D, como fotografías o pantallas digitales y del uso de dispositivos especiales como gafas, cascos, entre otros, se genera en el observador, a partir de dos imágenes capturadas de una forma correcta, disparidad binocular y estereopsis. La importancia de los sistemas de estereoscopia binocular es presentar cada imagen de forma independiente para cada ojo del observador y es de esta forma en que se han propuesto diversas tecnologías que separan en diferentes canales el par de imágenes 2D, entre estas tecnologías se encuentran los estéreo-canales basados en: i) diferencias espectrales, como los anáglifos, como se muestra en la Fig. 1. a), ii) diferencia de polarización, Fig. 1. b) y iii) diferencia temporal, Fig. 1. c), entre otros [2][7].

Los displays estereoscópicos son los sistemas más simples, pero a la vez los más prácticos hasta ahora, pues gracias a los desarrollos de la computación gráfica, es posible construir escenas fantásticas e incluso animaciones que pueden ser vista de forma tridimensional a un bajo costo computacional y tecnológico, sin embargo, por su principio de funcionamiento, los displays estereoscópicos ofrecen experiencias solitarias, debido a que solo la persona portadora del dispositivo visual requerido puede percibir la tercera dimensión. Además, debido a que los estereoscopios presentan solo dos imágenes de una misma escena, el observador solo puede percibir una única perspectiva tridimensional de esta, por lo que lo limita a estar en una única posición, o por otro lado, si este se desplaza seguirá percibiendo la misma perspectiva.

La limitación de solo percibir una sola perspectiva de una escena 3D, afecta el nivel de realismo tridimensional en este tipo de tecnologías, pues esperamos de una verdadera escena tridimensional que: si el observador se desplaza, exista un cambio en la perspectiva del objeto o la escena física. Estas dificultades se han ido solventando con sistemas mucho más sofisticados, los cuales son capaces

---

2D o 3D empleados por dispositivos electrónicos u otras técnicas ópticas.

de cambiar el par de imágenes estéreo, detectando el movimiento en el observador, tal es el caso de los sistemas de realidad virtual y aumentada, o incluso de sistemas mucho más complejos que son capaces de presentar más de un par estereoscópico en una misma pantalla de exhibición [8][9].

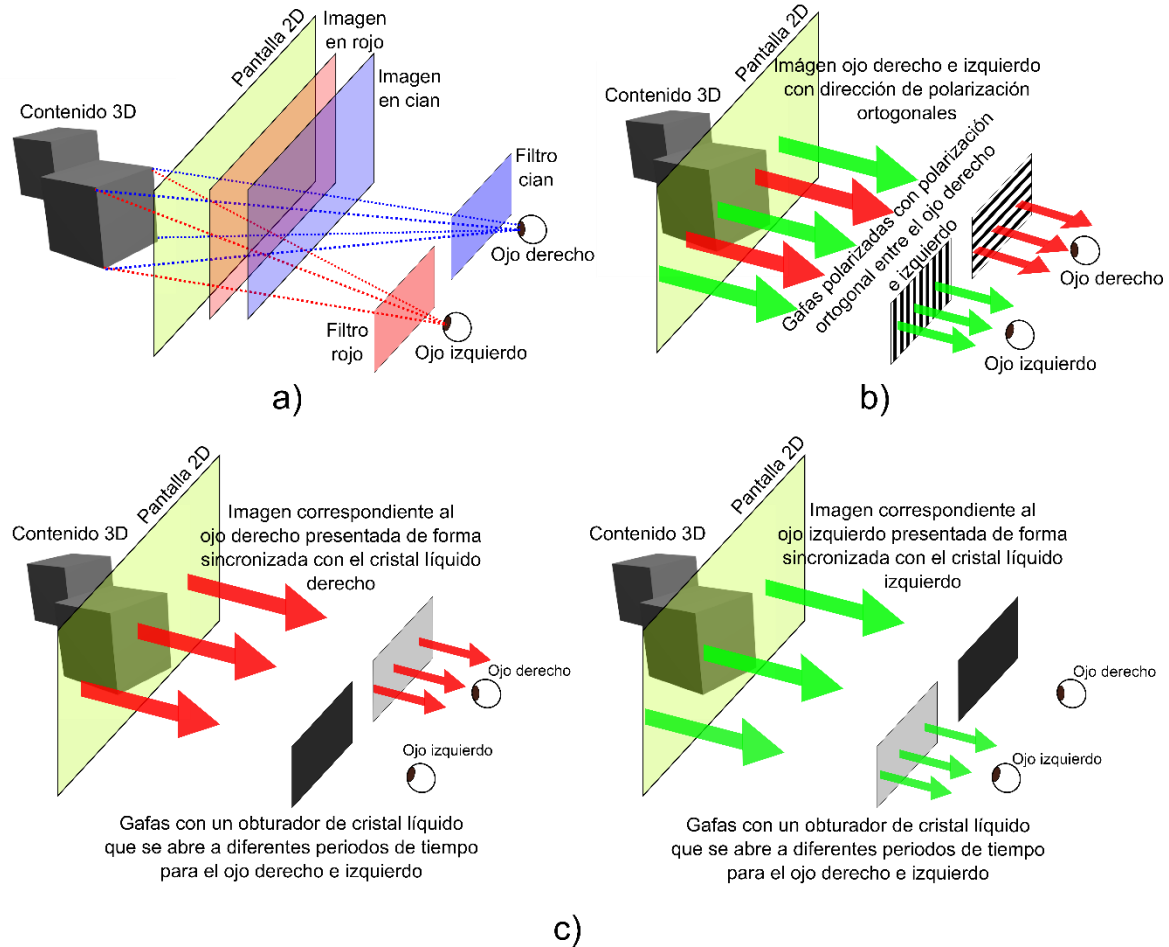


Fig. 1. Displays 3D estereoscópicos a partir de estéreo-canales basados en a) diferencia espectral, anaglifos, b) diferencia en polarización, display estereoscópico por polarización y c) diferencia temporal, display estereoscópico de multiplexado temporal, las vistas derecha e izquierda son presentadas de forma alternada y sincronizada con un obturador activo de cristal líquido que abre sucesivamente para un ojo mientras que ocluye el otro. Adaptado de [2].

En este sentido, aproximarse a un verdadero display 3D radica en la cantidad de información que es capaz de reproducir de una escena tridimensional y la precisión en que esta información es presentada a un observador [3]. Para entender este concepto definamos lo que debe ser un verdadero display 3D [3][2]: este es un display que funciona como una “ventana del mundo real”, es decir, si tenemos un observador frente a una escena 3D real, en donde este percibirá de esta: profundidad, cambios de

perspectivas, texturas, sombras, entre otras señales de profundidad, poner ahora un display 3D entre la escena 3D y el observador debe generar en este las mismas señales de profundidad como si este display fuera una ventana transparente de los objetos del mundo real, tal como se muestra en la Fig. 2 [2]. De esta forma, un display 3D debe tener la capacidad de imitar la direccionalidad y las características de la luz que es emitida por una escena 3D real.

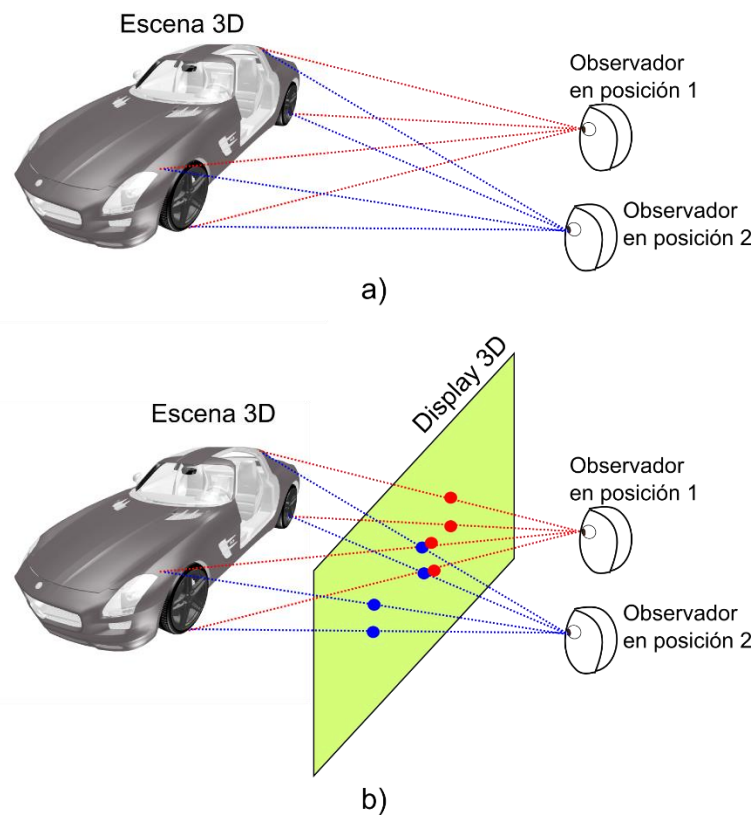


Fig. 2. Un verdadero display 3D funciona como una ventana transparente del mundo real. a) un observador frente a una escena 3D real. b) un observador frente a un verdadero display 3D, el cual reproduce la direccionalidad de la luz emitida por una escena 3D.

Para el caso de la tecnología estereoscópica, esta no lo hace de la manera más completa posible, pues estos dispositivos los cuales están basados en pantallas 2D, cada pixel sobre la superficie de la pantalla que la componen, tienen diferente información de color y brillo dependiendo de la imagen presentada, y cada uno de estos emite los mismos rayos en todas las direcciones. Es así, como es imposible proveer información para diferentes posiciones de un observador con una pantalla 2D. Incluso, si el observador cambia de posición, la pantalla 2D presentará la misma información para cada punto de observación. Este comportamiento de emisión omnidireccional impide a las pantallas de exhibición

2D de producir verdaderas experiencias tridimensionales[2][3].

Tecnologías más complejas se han desarrollado con el objetivo de generar experiencias más realistas, tal es el caso del extenso grupo de tecnologías libre de gafas o conocidas como sistemas autoestereoscópicos [10]. Entre este grupo se encuentran los displays de múltiple vista (multi-view display), imágenes integrales, displays volumétricos e incluso la holografía. Un esquema que clasifica los diferentes displays 3D se muestran en la Fig. 3 [2][3][7].

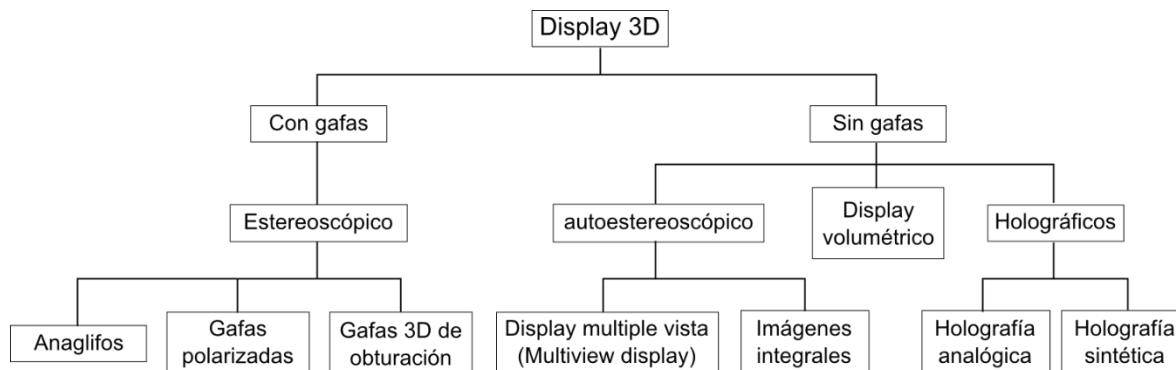


Fig. 3. Clasificación general de los display 3D. Con gafas: sistemas estereoscópicos. Sin gafas: displays autoestereoscópicos, diplays volumétricos y displays holográficos [7].

La tecnología basada en múltiple vista e imágenes integrales, los cuales pertenecen a los sistemas libres de gafas, al igual que los sistemas estereoscópicos están basados en tecnologías de exhibición 2D. Ambos métodos usan adicionalmente una superficie óptica en frente de la pantalla 2D para generar las imágenes autoestereoscópicas. Por ejemplo, para el caso de los displays de múltiple vista, las superficies ópticas pueden ser estructuras ópticas periódicas 1D como por ejemplo barreras de paralaje (parallax barrier), sistemas lenticulares y sistemas lenticulares inclinados [7]. Estos sistemas solo proveen información de paralaje horizontal a los observadores, por lo que estos se pueden desplazar de manera horizontal y para cada posición, el display 3D genera un par estereoscópico.

En el caso de las imágenes integrales, arreglos periódicos 2D de microlentes o aperturas pinholes son usados para generar imágenes autoestereoscópicas con información de paralaje horizontal y vertical en los observadores, acercándose mucho más al modelo presentado en la Fig. 2.

Otros ejemplos de displays 3D libres de gafas son los displays volumétricos y holográficos<sup>2</sup>. A diferencia de los métodos de múltiple vista e imágenes integrales que proveen diferentes puntos de vista a partir de pantallas planas 2D y superficies ópticas, los displays volumétricos forman voxels, elementos volumétricos, es decir, píxeles en un arreglo 3D para representar objetos virtuales en un espacio 3D [2].

Por otro lado, la holografía, propuesta por Denis Gabor en 1948 y aplicada por primera vez como display 3D por Emmett Leith y Juris Upatnieks, es una técnica capaz de reproducir la luz proveniente de un objeto a partir del registro de un patrón de interferencia con información de amplitud y fase del campo óptico reflejado por este [11][12][13]. Para generar un holograma, usualmente se implementa una configuración óptica como se esquematiza en la Fig. 4, el haz del láser es dividido en dos, el haz referencia, el cual es un haz que incide directamente sobre el material de registro (H) y un segundo haz, llamado haz objeto, que incide inicialmente sobre el objeto, cuya luz dispersada incide posteriormente sobre el material de registro (H). Es en este plano (H) en el que se superponen los dos haces de luz generando un patrón de interferencia modulado por el campo óptico del objeto (amplitud y fase). Una vez obtenido el holograma y dependiendo de la configuración óptica implementada, este puede ser reconstruido con una fuente de luz coherente o con una fuente de luz blanca convencional [13][12][11].

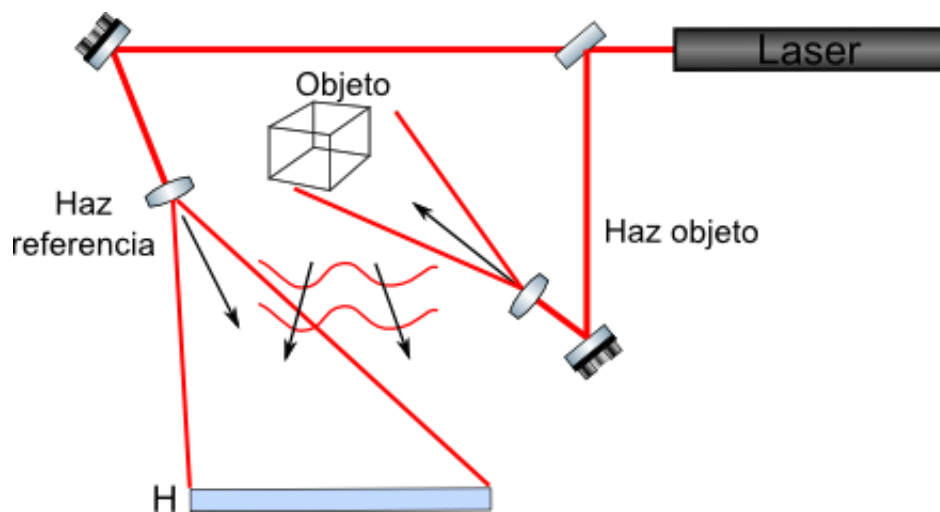


Fig. 4. Esquema de una configuración óptica para el registro de un holograma analógico.

<sup>2</sup> Aunque estos displays 3D son libres de gafas, no son clasificados dentro del grupo de sistemas autoestereoscópicos, ya que este término está reservado para los displays 3D que proveen estereopsis basada únicamente en imágenes de vistas direccionales.

Esta técnica a diferencia del resto de los displays 3D, los cuales proveen estereopsis basados en imágenes de vistas direccionales, es el único que tiene la capacidad de reconstruir no solo la direccionalidad de la luz, sino también el frente de onda de la luz reflejada por los objetos, por lo que se vuelve una tarea casi imposible diferenciar un holograma de su objeto original [14].

Diferentes técnicas holográficas han sido creadas para la visualización de hologramas de muchos tipos de objetos sin la necesidad de ser reconstruidos por una fuente de luz coherente, sin embargo, el registro de un holograma debe ser realizados en laboratorios bajo condiciones muy controladas. Los objetos deben estar presentes y por lo general estos deben ser inanimados, ya que cualquier movimiento del objeto puede alterar la formación de las franjas interferométricas. Por el contrario, para el registro de objetos vivos o escenas de gran formato, es necesario el uso de láseres pulsados, los cuales permiten registrar gran cantidad de luz en instantes de tiempo muy cortos para evitar al máximo cualquier cambio en el patrón de interferencia generado[15]. Si bien la holografía ha permitido la generación de sistemas de exhibición 3D con las características de la realidad física, estos se han realizado bajo condiciones de laboratorio y con equipos e instrumentos de alto costo, lo que ha dificultado el uso práctico y comercial de tecnologías holográficas como displays 3D[14][15][16].

Con el interés de solventar estas limitaciones, la estereoscopia holográfica, propuesta inicialmente por R.V. Pole en 1967 [17], surge como una técnica que permite la síntesis de hologramas para cualquier tipo de objeto o escena, a partir del registro de una matriz de pequeños hologramas con imágenes de vistas direccionales de las escenas. En este sentido los estereogramas holográficos son un display holográfico que reduce significativamente los requerimientos de información en comparación con la holografía analógica [15]. Esta técnica, se fundamenta en el registro holográfico de una secuencia de imágenes 2D que contienen la información de las diferentes perspectivas del objeto, siendo estas capturadas de forma incoherente, es decir, con luz blanca a partir de cámaras reales o virtuales [15][18][19].

Por sus características, esta técnica posee gran versatilidad, pues no solo permite elaborar hologramas de cualquier tipo de escena, objetos vivos o inanimados, sino también, permite sintetizar objetos creados por computador gracias al desarrollo tecnológico de los Moduladores Espaciales de Luz (SLM) y de los softwares de computación gráfica[20][21].

Actualmente, la estereoscopia holográfica está cambiando el paradigma de los sistemas visuales 3D, permitiendo a múltiples usuarios la visualización 3D y la interacción espacial con objetos o escenas

complejas tanto reales como creadas en computador, gracias a la información vertical y horizontal de paralaje, y el alto realismo que presentan debido al uso de la holografía y de la computación gráfica [21][22][23].

Sus características técnicas han permitido que la estereoscopia holográfica potencie las comunicaciones visuales, presentado información 3D para diferentes aplicaciones como la cartografía [24], la industria militar, la arquitectura, la medicina y el arte [22][23][25][14], permitiendo su comprensión e interpretación de forma efectiva.

La estereoscopia holográfica representa el siguiente paso en la creación de escenas 3D mucho más realistas, pero requiere de un gran esfuerzo por desarrollar tecnología opto-mecánica que permita su elaboración de manera eficiente, a un bajo costo y de la generación de la enorme cantidad de imágenes requeridas.

### **1.1 Sobre esta tesis: desarrollo óptico y computacional de una holoimpresora**

La línea de holografía del Grupo de Investigación Óptica Aplicada, dentro de su quehacer científico tiene como objetivo la investigación y desarrollo de técnicas de holografía sintética basada en imágenes, como por ejemplo los estereogramas holográficos (EH). Esta técnica, la cual es el tema de estudio en esta tesis, tiene como propósito desarrollar tecnología que posibilite la impresión de hologramas de objetos reales y generados en computador.

La implementación de un sistema de estereoscopia holográfica, tecnología que llamaremos en este trabajo como *holoimpresora*, pasa por el desarrollo de tres componentes diferentes que deben integrarse de manera precisa para lograr el resultado deseado [14][12][28][29][19]:

- Implementación computacional: En este tipo de holograma el objeto a registrar es una secuencia de imágenes bidimensionales obtenidas a partir de un adecuado muestreo, ya sea de objetos reales usando cámaras reales o de un objeto digital diseñado computacionalmente y muestreado con cámaras virtuales a través de softwares de computación gráfica [19][30]. Estas imágenes son acondicionadas para obtener distribuciones de intensidades que aportan información de la dirección de la luz proveniente del objeto, generando así en un observador no solo una experiencia estereoscópica sino también de cambios de paralaje [30][31][32].
- Sistema ópto-mecánico: es esencialmente un sistema óptico de proyección de imágenes, las cuales son presentadas una a una en un modulador espacial de luz (SLM, siglas en inglés), y que son consideradas como objeto para el registro holográfico, además, es implementado un sistema

óptico para el “objetivo de escritura” que genera la onda objeto para ser superpuesto con el haz de referencia. La superposición de estos dos frentes de onda se da en forma de un pequeño holograma en forma de punto, denominado *hogel* (holograma elemental) [33][29][34][35][36]. Una holoimpresora requiere en su configuración óptica, moduladores espaciales de alta resolución y de un alto contraste, un sistema óptico con las mínimas aberraciones posibles y un objetivo de escritura de apertura numérica grande.

- Sistema de control y registro: el sistema de desplazamiento en el plano del material de registro, posibilita la escritura de todos los hogel en un arreglo matricial de manera automática. Adicionalmente, esta etapa permite manipular de forma controlada, los tiempos de exposición para láseres de onda continua y los pasos de desplazamiento entre hogel[15].

Los EH obtenidos a partir de desarrollos previos, evidencian el dominio que se ha adquirido en estos sistemas, con los que se han registrado por ejemplo hologramas elementales, *hogels*, de reflexión que componen el holograma sintético, y también el dominio de los métodos computacionales para la adquisición y generación de las imágenes que deben ser registradas en cada uno de los hogels. Finalmente, a partir de estos desarrollos fue posible obtener hologramas sintéticos de paralaje completo con imágenes 3D virtuales registrados por un prototipo de holoimpresora.

Los resultados obtenidos han permitido identificar los requerimientos necesarios en relación al sistema óptico y a la adquisición de las imágenes para obtener imágenes 3D de mayor calidad.

En relación al sistema óptico se observó que para los EH obtenidos, se requiere mejorar las condiciones de registro como por ejemplo, disminuir el tamaño del hogel y aumentar la cantidad a ser registrados para así obtener imágenes 3D de mayor resolución. El campo visual de observación debe aumentarse para mejorar la experiencia visual y permitir una fácil interpretación de los objetos 3D y mejorar los sistemas ópticos de registro para aumentar la eficiencia de difracción de los EH.

En cuanto a la adquisición de las imágenes, se ha identificado que los desarrollos logrados en la implementación computacional prueban ser un gran avance en la investigación desarrollada en proyectos anteriores. Actualmente se cuentan con dos métodos de adquisición de imágenes, basados en cámaras virtuales, con los cuales se generan las secuencias de imágenes 2D para la reconstrucción de imágenes 3D virtuales de paralaje completo [37][38]. Sin embargo, los métodos desarrollados actualmente, presentan un alto gasto en tiempo de cómputo y de hardware, además, como se acaba de mencionar, solo es posible obtener imágenes virtuales, es decir, imágenes 3D que se encuentran por detrás del medio en que son registrados, lo que hace del desarrollo actual menos interesante con

respecto a las demás tecnologías de exhibición 3D e incluso con la misma holografía, capaz de generar imágenes 3D que pueden flotar en el aire por fuera del medio de registro, hologramas conocidos como plano imagen. Estos efectos son atractivos para los observadores y presentan grandes ventajas como sistemas de exhibición espaciales.

Es así, como los desarrollos alcanzados hasta ahora hacen manifiesto la necesidad de mejorar las condiciones ópticas del sistema holoimpresora para aumentar la calidad de las imágenes tridimensionales y además, optimizar y proponer algoritmos que generen imágenes 2D para producir imágenes 3D virtuales, y también, obtener imágenes 3D con partes de la escena por fuera del material de registro, es decir imágenes 3D reales.

En este sentido, los objetivos propuestos para esta tesis fueron: i) Evaluar y documentar el estado del arte de la técnica que se desea estudiar y de las posibles técnicas de imágenes 3D autoestereoscópicas que permiten visualizar imágenes 3D reales, es decir imágenes flotantes. ii) Determinar a partir del análisis de los principios físicos y geométricos de los estereogramas holográficos, las técnicas viables y posibles de implementar para la obtención de imágenes 3D reales a partir de imágenes 2D. iii) Desarrollar una metodología que mediante imágenes 2D obtenidas por softwares de computación gráfica puedan ser sintetizados estereogramas holográficos de paralaje completo por escritura directa y que reproduzcan imágenes 3D reales. iv) Implementar y evaluar los algoritmos y recursos computacionales requeridos para la generación de las imágenes 2D que permiten la obtención de este tipo de imágenes 3D. v) Diseñar e implementar un sistema óptico capaz de generar las condiciones ópticas requeridas en el registro de estereogramas holográficos de paralaje completo y que satisfacen los parámetros mínimos deseados para su exhibición. vi) Registrar estereogramas holográficos de paralaje completo por escritura directa de diferentes escenas con los que puedan ser evaluadas la calidad de la implementación óptica experimental y las imágenes 3D reales.

Para el logro de estos objetivos, en el capítulo 2 de este trabajo se discuten los fundamentos de la estereoscopia holográfica, a partir de los cuales es descrito y analizado en el capítulo 3, el sistema opto-mecánico requerido e implementado para el registro de estereogramas holográficos de paralaje completo usando una configuración óptica de escritura directa.

En el capítulo 4, son estudiados y descritos los algoritmos con los que se obtienen imágenes 3D reales, virtuales y plano imagen, y con los cuales se logra un buen uso de los recursos computacionales con que cuenta el laboratorio.

Finalmente, en el capítulo 5 son descritos y discutidos los resultados obtenidos a partir de la

implementación computacional y óptica desarrollada bajo las descripciones de los capítulos anteriores. En el que son descritos varios EH de paralaje completo y de paralaje solo horizontal obtenidos, los cuales permiten evaluar la calidad del sistema óptico de la holoimpresora implementada, de los modelos computacionales analizados y sus respectivas implementaciones.

En este sentido, este trabajo presenta un contenido y una estructura original, pues desde una perspectiva integral, este trabajo expone dos etapas que son complementarias y mutuamente necesarias: el desarrollo de la tecnología para el registro y exhibición de información tridimensional y el desarrollo de un método computacional para obtener dicha información.

## 2 Fundamentos de estereoscopia holográfica

La holografía, como técnica de exhibición tridimensional, fue ampliamente desarrollada por científicos y promovida comercialmente por artistas, museólogos y por supuesto por inversionistas que buscaban promover la holografía como el display 3D por excelencia. Sin embargo, no costó mucho en entender las dificultades técnicas y tecnológicas que debían resolverse para ser usada de forma comercial, transformándose rápidamente de una realidad a una promesa tecnológica que faltaba por madurar, y quedando en manos de universidades, centros de investigación y de un selecto grupo de holografistas su desarrollo [15].

Bajo estas dificultades, hubo varios y exitosos intentos por sintetizar artificialmente hologramas que no requerían de la presencia de un objeto real como si lo hace la holografía clásica o analógica y a su vez buscaban mitigar sus limitaciones experimentales. Diferentes aproximaciones fueron desarrolladas y que en la actualidad aún son objeto de estudio. Estas aproximaciones se pueden clasificar dentro de dos métodos: i) una forma de sintetizar hologramas es calculando computacionalmente la microestructura del holograma, es decir, calcular el patrón de difracción para una escena que puede ser creada en computador y que posteriormente es grabada a partir de litografía óptica o litografía por haces de electrones [39][40], y ii) sintetizar hologramas a partir del registro óptico de una secuencia de imágenes con las perspectivas de la escena, usando la configuración de registro de la holografía clásica [19]. En la Fig. 5 se ilustran los dos métodos mencionado.

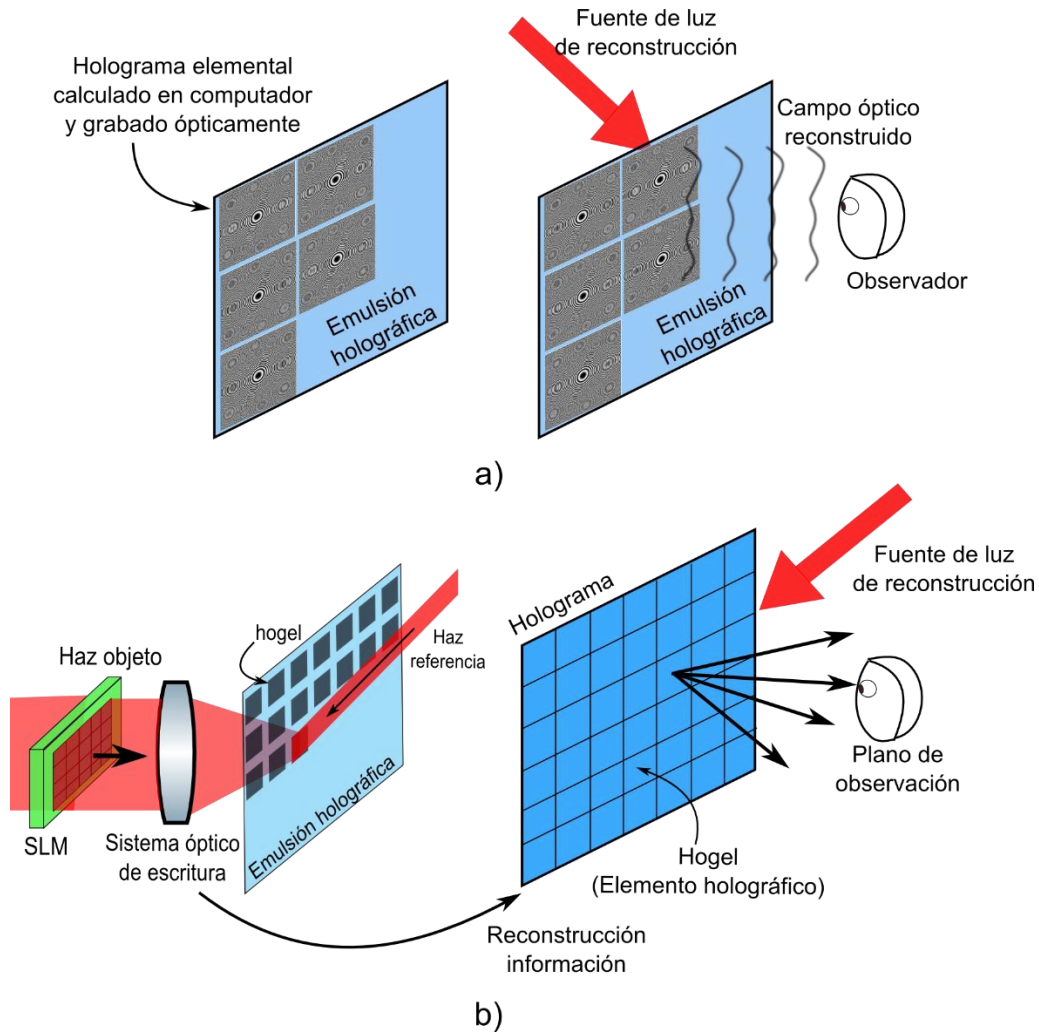


Fig. 5. Métodos para la síntesis de hologramas: a) producir numéricamente el patrón de interferencia de pequeños hologramas y b) sintetizar un holograma a partir del registro óptico de una secuencia de imágenes 2D de una escena 3D.

De forma general, el primero de estos se basa en sintetizar la estructura de difracción para generar información tridimensional a partir de la reconstrucción del frente de onda de la escena 3D, dentro de los cuales podemos encontrar los hologramas generados por computador. El segundo método, se basa en el registro de imágenes de vistas direccionales a partir del uso de las configuraciones ópticas de la holografía clásica, para generar en un observador la percepción binocular, de estereopsis y de cambios de paralaje. Este último método podemos entenderlo desde una perspectiva de los displays 3D de múltiples vistas.

Dentro de este último grupo se encuentra la estereoscopia holográfica, técnica que ha ganado gran popularidad debido a su alto impacto visual y además, ha recibido mucha atención por grupos de investigación [15][12][19][41] debido a su capacidad para reducir significativamente la cantidad de información requerida y el costo computacional que por ejemplo los hologramas sintéticos basados en la reproducción numérica de la microestructura del holograma exigen.

Los estereogramas holográficos, técnica que será el centro de análisis y desarrollo en este trabajo, requiere de la implementación de una holoimpresora que permita: i) la generación de las imágenes de paralaje con la información direccional de una escena 3D, tema que será tratado en el capítulo 4 y ii) de un dispositivo opto-mecánico que de forma autónoma registre el conjunto de hologramas elementales que componen un estereograma holográfico. Este último tema será tratado en detalle en el capítulo 3.

De esta forma, este capítulo busca describir los principios fundamentales de los estereogramas holográficos (EH), para así comprender los requerimientos de la tecnología usada para el registro, y su importancia en la calidad de la experiencia estereoscópica y de paralaje que se debe generar en un observador.

### 2.1 Estereogramas holográficos (EH)

En 1990, Masahiro Yamaguchi, et al. [24], proponen la síntesis de hologramas de paralaje completo a partir de una configuración de escritura directa, es decir, a partir de una sola etapa para su registro.

La tecnología de impresión de hologramas propuesto por Yamaguchi, que se muestra en la Fig. 6, fue la primera en utilizar un modulador espacial de luz (SLM), que en cuyo caso utilizó una pantalla de cristal líquido (LCD, Liquid Crystal Display), para presentar cada una de las imágenes 2D requeridas para su registro, y usó un sistema formador de imagen para generar en forma de un pequeño punto un holograma de reflexión por cada una de estas. Yamaguchi introduce el nombre de *hogel* para referirse a este holograma elemental. En el contexto de los EH el *hogel* es un pixel holográfico.

Debido a la estructura bidimensional del holograma sintético, es decir, compuesto por una matriz de hogels, los EH producidos por Yamaguchi, generaban experiencia estereoscópica y contenían información horizontal y vertical de paralaje.

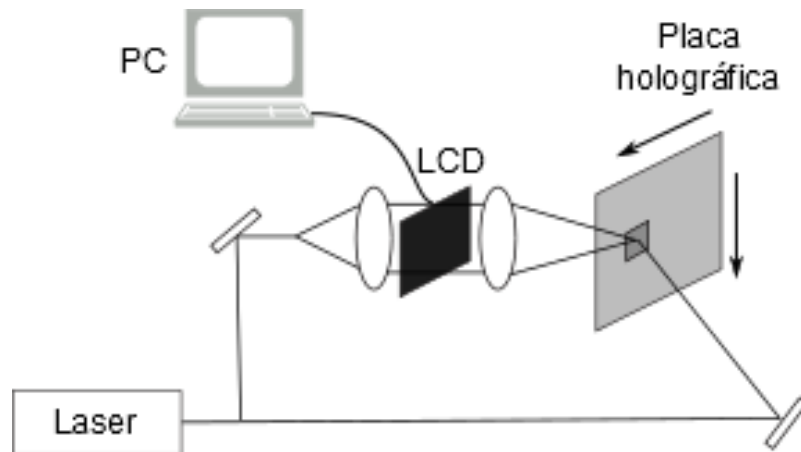


Fig. 6. Holoimpresora de escritura directa y paralaje completo propuesta por M. Yamaguchi, et. al.

Estos desarrollos permitieron a Yamaguchi et al., proponer el concepto de lo que hoy se conoce como *holoprinter* [15] [24], dispositivo ilustrado en la Fig. 6. En este trabajo, el término *holoprinter* se traduce como *holoimpresora*.

Posteriormente, a partir de los trabajos desarrollados en el MediaLab del MIT liderado por Stephen Benton surge la empresa Zebra Imaging Inc [23], que junto a la empresa Geola [22] fundada en forma casi paralela por David Brotherton et. al, extienden la técnica a grandes formatos, a hologramas de reflexión a color, hologramas de múltiples canales e implementan nueva tecnología empleando láseres pulsados y nuevos diseños ópticos.

Los resultados logrados por estas instituciones han probado que los EH elaborados por la tecnología de impresión de hologramas por escritura directa, presentan una calidad de imágenes 3D nunca antes imaginado.

## 2.2 Registro de Estereogramas holográficos

Un EH es un holograma sintetizado a partir de un conjunto de hogels. Cada uno de estos es el registro holográfico de una imagen 2D con información de paralaje de una escena 3D. Una vez reconstruido el holograma, cada uno de estos hogels funcionan como emisores de luz direccional cuya intensidad varía dependiendo de la información de la escena 3D y de la posición del observador, un análisis más detallado de la reconstrucción se presenta en la siguiente sección.

Para el registro de un EH, es necesario desarrollar e implementar un sistema opto-mecánico, que de

manera automática, permita el registro holográfico de cada uno de los hogels de forma sincronizada, rápida y estable. Su configuración óptica está basada en una configuración de hologramas analógicos de reflexión, pero a diferencia, hace uso de tecnología digital para presentar la información de los objetos 3D.

Este sistema consiste de una fuente de luz coherente, en cuyo caso una fuente de luz láser en el visible, que es dividida en dos haces, un haz objeto y un haz referencia.

El haz objeto, como se muestra en la Fig. 7, se propaga a través de un modulador espacial de luz (SLM), que puede ser una pantalla de cristal líquido (LCD), de cristal líquido sobre silicio (LCOS) o un dispositivo digital de micro-espejos (DMD), en el que se proyecta una imagen 2D con información de paralaje de la escena 3D. En este trabajo la imagen registrada en el hogel es llamada *imagen hogel*.

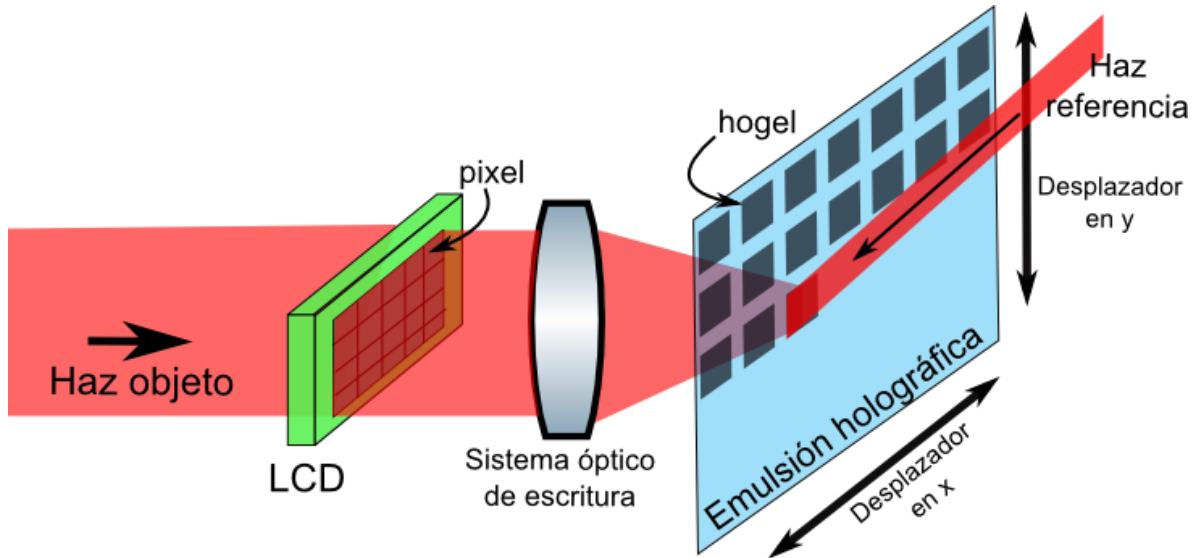


Fig. 7. Registro de un EH de paralaje completo bajo una configuración óptica por escritura directa.

La imagen hogel es proyectada en el SLM e iluminada por el haz objeto. Posteriormente, esta imagen es enfocada, a partir de un sistema óptico de escritura de apertura numérica grande, sobre el área de exposición del medio de registro, donde se generará el hogel. Este tipo de configuraciones, hace uso también de una pequeña apertura física de forma cuadrada o circular, que se ubica en un determinado plano del sistema formador de imagen, generando una imagen de esta sobre el área de exposición del medio de registro para definir la forma geométrica y el tamaño del hogel [8] [24] [15] [35] [36].

De forma análoga, el haz referencia hace uso de un sistema de lentes, menos complejo que el

empleado en el haz objeto, para generar una imagen de una apertura física sobre la misma área de exposición, de igual tamaño y geometría que del punto generado en la configuración del haz objeto [8] [35]. El haz referencia se configura para que incida sobre el medio de registro con un sentido de propagación opuesto al generado en el haz objeto para el caso de hologramas de reflexión.

Este registro se realiza de forma secuencial para cada una de las diferentes imágenes hogel generadas. Para esto, se emplea un desplazador mecánico tanto horizontal como vertical para el registro de un estereograma holográfico de paralaje completo EH-PC o de manera solo horizontal para el caso de un estereograma holográfico de paralaje horizontal EH-PH.

Finalmente, el SLM y todas las componentes opto-mecánicas como el desplazador XY y el obturador del láser son controlados por computador para que, de manera sincronizada y precisa, se registre secuencialmente cada uno de los hogels.

Para la reconstrucción, como en un holograma de reflexión, solo se requiere de una fuente de luz blanca que incida bajo las mismas condiciones geométricas del haz referencia, configuración que satisface las condiciones de Bragg para los planos de interferencia generados a lo largo del volumen del medio de registro en el momento del registro.

### **2.3 Reconstrucción y exhibición tridimensional y de paralaje de un estereograma holográfico**

Como ya se ha mencionado, los EH pueden ser descritos usando el modelo de profundidad estereoscópico. En estos, cada punto ubicado sobre la superficie del display actúa como un emisor direccional de la información de paralaje o de los puntos de vista que contiene, tal como se ilustra en la Fig. 8.

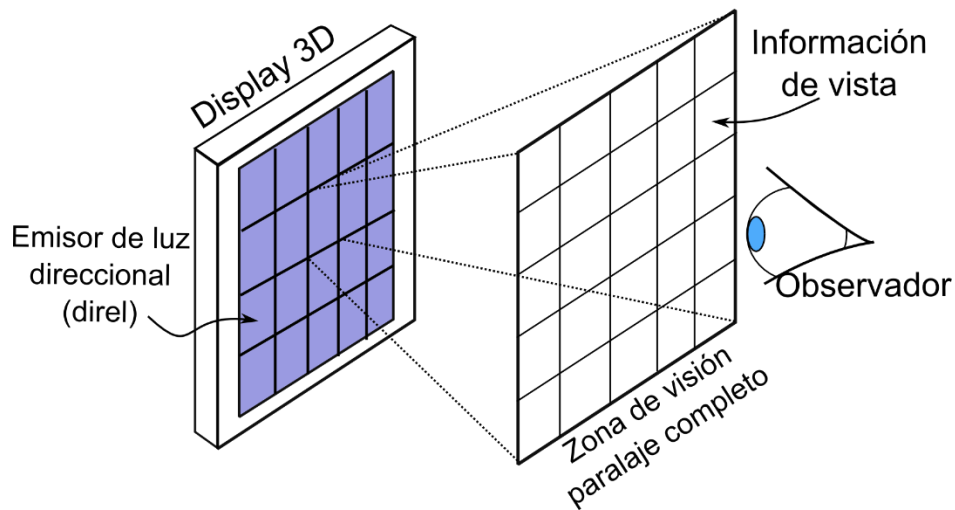


Fig. 8. Información presentada por un display 3D de paralaje.

De esta forma, los puntos sobre el medio de registro del EH que actúan como emisores direccionales son los hogels, los cuales son registrados ópticamente como se describió en la sección anterior. El hogel emite un conjunto de rayos de una determinada intensidad sobre una ventana de visualización y un observador en esta zona intercepta la luz proveniente del hogel, a la vez que otros rayos de luz provenientes de otros hogels en diferentes direcciones que interceptan la misma posición. De esta forma, el EH presenta una única imagen para cada ojo del observador compuesta por estos diferentes rayos direccionales que corresponden en intensidad y dirección a los generados por un objeto o escena 3D que se desea exhibir. Esta relación, entre el EH como display paraxial y su zona de visión, se muestra en la Fig. 9.

Debido al sistema óptico utilizado para el registro, esquema presentado en la Fig. 7, y la técnica holográfica empleada, cada hogel es un patrón de interferencia modulado por la amplitud y la fase del campo óptico del haz objeto, el cual está compuesto por la información contenida y características físicas del SLM y por la amplitud y fase del campo óptico generado por el sistema óptico de escritura utilizado. De esta forma, reconstruir un EH, implica reconstruir el campo óptico generado por el sistema óptico de escritura y la imagen bidimensional presentada en el SLM. Para los EH de paralaje completo (EH-PC), un sistema óptico de escritura compuesto por lentes esféricas es implementado, generando así una distribución angular tanto horizontal como vertical de rayos, con intensidades moduladas por la imagen presentada en el SLM. Y también, determina el campo visual en el que el observador puede desplazarse para observar diferentes perspectivas de una escena 3D.

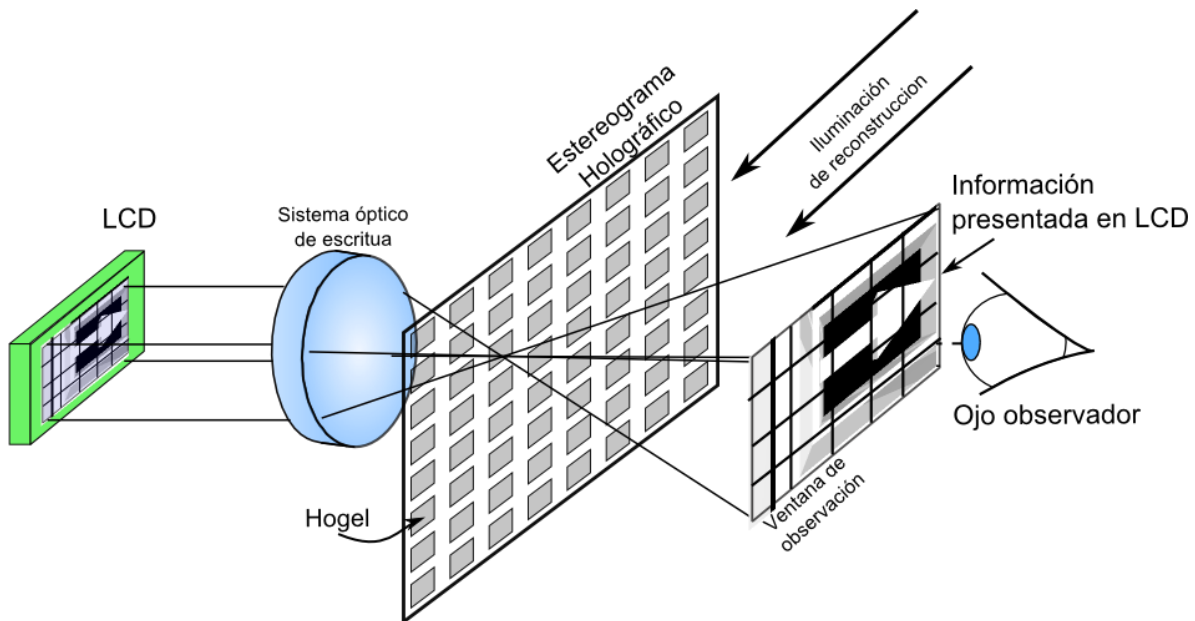


Fig. 9. Reconstrucción de un estereograma holográfico (EH). Relación entre LCD, sistema óptico de escritura y ventana de observación.

Este campo visual, está determinado por la apertura numérica del sistema óptico de escritura que se rige por la ecuación 1), donde NA es el valor de la apertura numérica del sistema óptico de escritura,  $n$  el índice de refracción del medio en el que se encuentra el sistema óptico y  $\theta$  es el máximo ángulo medio del cono de luz que sale del sistema óptico de escritura.

$$NA = n \sin \theta \quad 1)$$

De esta forma, si tomamos los rayos marginales generados por el EH, se puede ver que la zona donde el observador percibe información de paralaje del display 3D por los dos ojos, depende directamente de la apertura numérica del sistema óptico de escritura. Tal como puede ser visto en la Fig. 10.

Por otro lado, el SLM cumple una función también muy importante para el registro de la información: i) este es el dispositivo digital que proyecta la imagen de paralaje, es decir, la imagen que tiene codificada la distribución de intensidades correspondientes a una escena 3D y ii) siendo el SLM un dispositivo con una estructura discreta compuesto por píxeles, la cantidad de rayos que son emitidos por un hogel es proporcional a la resolución del SLM. En este sentido, la cantidad de paralaje o cambios de perspectiva que presenta un EH es proporcional a la resolución del SLM.

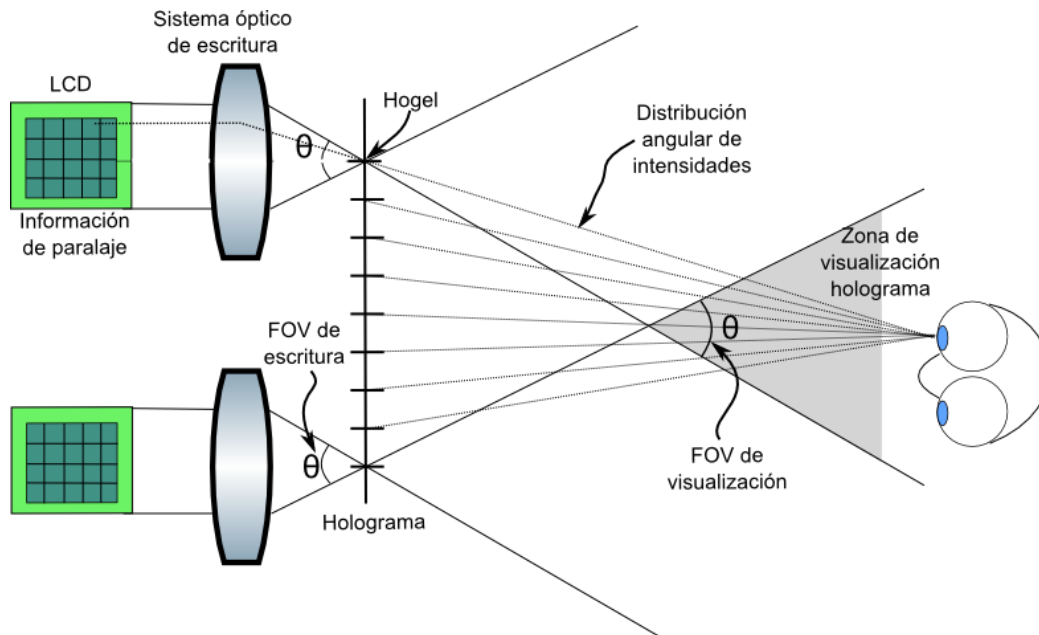


Fig. 10. Modelo geométrico de reconstrucción de un EH-PC. Relación entre el campo visual de escritura y de visualización  $\theta$ , información de paralaje y resolución de la imagen 3D presentada por un EH.

En resumen, podemos entender un EH a partir de un modelo estereoscópico, en el que la percepción de disparidad binocular, de estereopsis y por lo tanto los cambios de paralaje, se generan en un observador a partir de las distribuciones de luz producidas por los hogels en cada punto de vista o posición de los ojos del observador dentro de una ventana de visualización, los cuales buscan reproducir lo más realista posible la intensidad y dirección de los rayos que emitiría una escena 3D real o generada en computador. [8] [15] [35] Este modelo general puede verse en la Fig. 10.

De esta forma, es necesario postular un conjunto de relaciones que determinen los requerimientos necesarios para la generación de las imágenes que deben ser registradas en cada hogel y para la construcción de un sistema de holoimpresora, obteniendo los mejores desempeños bajo las condiciones del laboratorio. Estas relaciones son presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Relaciones físicas entre la calidad de la experiencia 3D generada por un EH y de las partes que componen una holoimpresora.

---

<ul style="list-style-type: none"><li>• El campo visual (FOV) de un EH depende de la apertura numérica del sistema óptico de escritura del hogel</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• La cantidad de paralaje que puede presentar un EH como información tridimensional de una escena, depende de la resolución espacial del SLM utilizado y de la apertura numérica del sistema óptico de escritura.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Estando basada la información tridimensional de una escena 3D presentada por un EH en rayos con diferentes intensidades, la calidad de su reconstrucción depende del rango dinámico presentado por el SLM.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• La resolución de la imagen 3D presentada por un EH depende del tamaño y la cantidad de los hogels registrados.</li></ul>

---

### 2.4 Generación de las imágenes para estereogramas holográficos

La adquisición de las imágenes sobre las cuales se obtiene información de paralaje, puede realizarse a partir de un arreglo de cámaras fotográficas que son configuradas horizontalmente para la elaboración de EH-PH o en un arreglo bidimensional para EH-PC [42]. Por otro lado, puede realizarse también con cámaras en movimiento usando un riel mecánico, estos sistemas han sido implementados por ejemplo para la comercialización de porta-retratos holográficos [15][43][44].

Con el desarrollo de la computación gráfica, la información de paralaje es obtenida con el uso de softwares que permiten implementar cámaras virtuales, las cuales están basadas en transformaciones geométrica que permiten llevar una nube de puntos tridimensionales a un plano 2D. Además, son usados diferentes algoritmos para procesar la apariencia de escenas creadas en computador o incluso, escenas 3D reales que son digitalizadas, para generar imágenes con la información de la escena 3D percibida desde puntos de vistas específicos. Estos desarrollos producen métodos más eficientes y con calidad de imágenes superiores a las obtenidas con cámaras reales, posibilitando experiencias 3D más realistas.

Diferentes métodos, algoritmos y optimizaciones que se utilizaron en este trabajo son estudiadas, analizadas y propuestas en el capítulo 4.

### **3 Diseño e implementación de una holoimpresora**

Para la síntesis de hologramas basados en EH es necesario el desarrollo e implementación de una holoimpresora, que de manera automática, rápida y estable exponga en un arreglo bidimensional un conjunto de hogels con información de paralaje de una escena 3D. Para lograrlo, se requiere elaborar un conjunto de etapas como lo son: i) una implementación computacional, compuesta básicamente por la generación del modelo 3D y a partir de este, de su procesamiento para la generación de las imágenes hogel, ii) la implementación opto-mecánica para el registro del conjunto de imágenes 2D en forma de hogels, y iii) la etapa de control y registro, compuesto por algoritmos desarrollados e implementados en un computador para el control de los sistemas opto-mecánicos y de los procesos experimentales para la determinación de parámetros ópticos para el registro. Cada una de estas etapas son integradas de la forma en que se ilustra en la Fig. 11.

Esta sección desarrolla las dos últimas etapas mencionadas: la descripción y análisis de los elementos opto-mecánicos que componen una holoimpresora y del diseño e implementación de un sistema óptico de escritura directa y de control para producir imágenes 3D con mayor fidelidad.

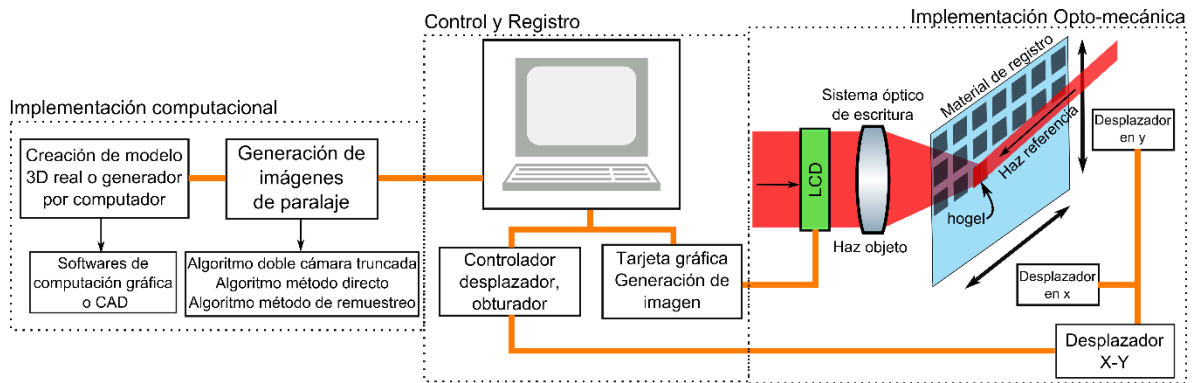


Fig. 11. Etapas que componen una holoimpresora para la síntesis de hologramas.

### 3.1 Análisis de la configuración de la holoimpresora

Una holoimpresora está compuesta por: una fuente de luz coherente, un divisor de haz para dividir el haz del láser en dos caminos, el haz objeto y el haz referencia, que controla además sus relaciones de intensidad, un sistema óptico para dirigir cada uno de estos haces hacia el material de registro, un modulador espacial de luz (SLM) para modular el haz objeto a partir de una imagen que es proyectada en este, un desplazador mecánico de dos dimensiones para desplazar el material de registro, un obturador mecánico para el disparo del haz de luz del láser y el sistema de control por computador.

En la Fig. 12 se muestra un esquema simplificado de la holoimpresora desarrollada e implementada en el laboratorio de holografía de la Universidad EAFIT que integra cada una de estas componentes.

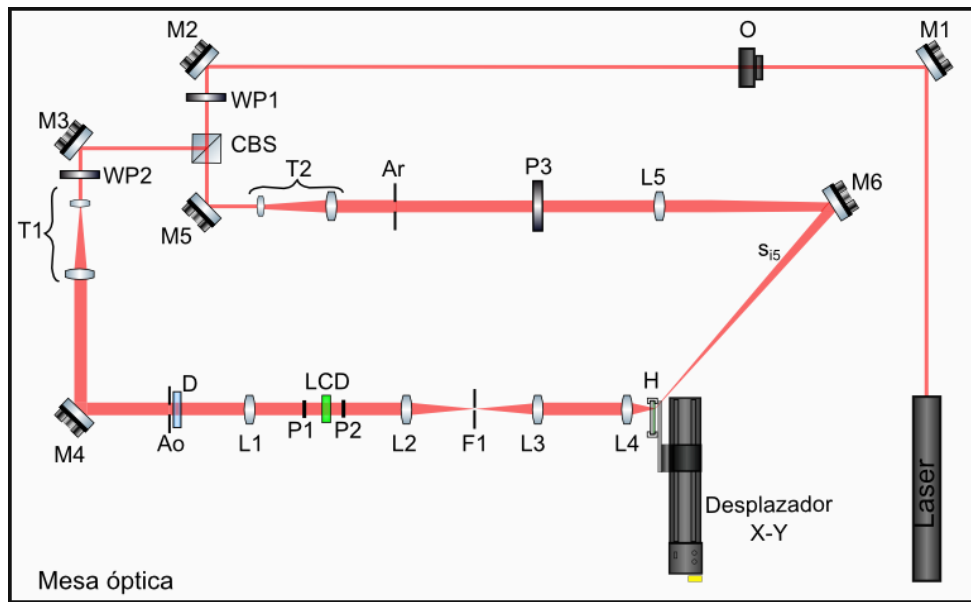


Fig. 12. Esquema general de la configuración óptica de la holoimpresora implementado.

Como fuente de luz coherente, es usado un láser HeNe de 633 nm de 30 mW. El haz del láser es desviado por un espejo (M1) que luego atraviesa el obturador (O), el cual controla los tiempos de exposición de los hogels sobre el material de registro. El divisor de haz está compuesto por una placa  $\lambda/2$  (WP1) a la entrada de un cubo divisor de haz polarizado (CBS) para controlar la relación de intensidades entre el haz referencia y el del objeto, y otra (WP2), a la salida de uno de los haces para compensar el estado de polarización entre los dos haces.

El haz referencia está compuesto por un expansor de haz (T2) para iluminar la apertura  $A_r$  que determina la geometría y el tamaño del hogel deseado, posteriormente es utilizado un sistema formador de imagen para generar la imagen real de esta apertura sobre el material de registro (H).

El haz objeto una vez reflejado por el cubo divisor de haz (CBS), es ajustado por la placa  $\lambda/2$  WP2 y expandido por el expansor T1. El haz incide posteriormente sobre la apertura  $A_o$ , que determina la geometría y el tamaño del hogel, y a partir de un sistema óptico de tipo “relay” [45], es formada su imagen real con un factor de magnificación sobre el material de registro.

Paralelamente, sobre el medio de registro (H) y bajo esta misma configuración óptica, es enfocada y generada la transformada de Fourier del SLM, en cuyo caso es usada una pantalla de cristal líquido (LCD) de tipo twisted nematic. El sistema de lentes implementado crea también una imagen del LCD aumentada en un plano posterior del plano holograma (H). Un análisis más detallado de las componentes ópticas de este sistema es descrito en la sección 3.1.5.

Finalmente, el haz objeto y el haz referencia, son alineados cuidadosamente para superponerse sobre la misma área del material de registro y a partir de un desplazador mecánico vertical y otro horizontal, esta es desplazada por cada exposición.

#### **3.1.1 Láser y obturador**

Para la exposición y el control de los tiempos de exposición de cada uno de los hogels, es usado un obturador eléctrico de la empresa Edmund Optics [46]. Este opera normalmente en una posición cerrada y es abierto una vez una señal de voltaje de 5VDC es aplicada a la entrada del obturador. Las especificaciones técnicas del obturador son descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción técnica obturador [46].

Descripción	Valor
Voltaje de operación (V)	4.5 V ~ 5.5 V DC
Tiempo de Activación (ms)	30
Tiempo de desactivación (ms)	50
Tamaño apertura (mm)	20

El obturador es controlado a partir de un Arduino DUE y una aplicación elaborada en LabView, la cual es descrita en la sección 3.1.3.

Debido a que el obturador tiene un tiempo de activación y un tiempo de desactivación que suman en total un tiempo de 80 ms, este tiempo afecta la exposición sobre el medio de registro, adicionándose al tiempo de exposición asignado en el código de control. Este comportamiento se ilustra en la Fig. 13.

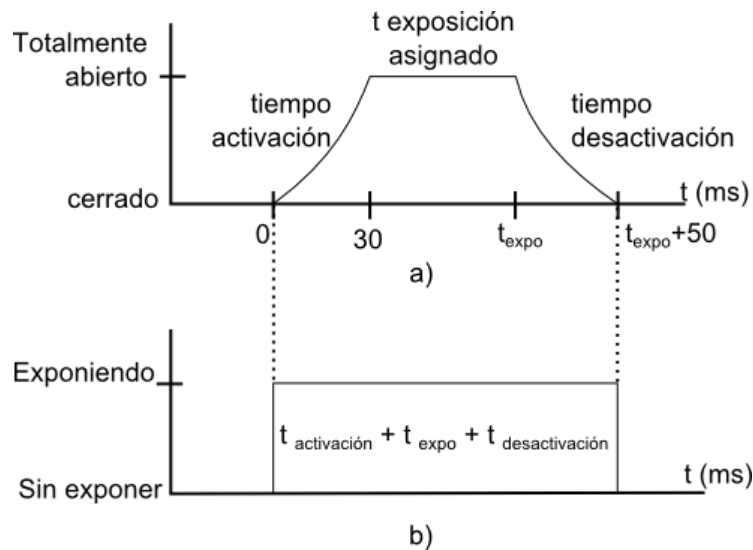


Fig. 13. Uso del obturador para el control de la exposición. a) operación del obturador, b) tiempo en que es expuesta la emulsión holográfica.

De esta forma, para obtener la exposición deseada y eficiencias de difracción acordes a la exposición del material, este tiempo debe ser restado del tiempo de exposición calculado.

Asignando esta modificación al algoritmo de control y bajo experimentos de prueba realizados, se detectó que el tiempo de obturación mínima bajo el cual el obturador presenta una apertura total es de 0.1 s. Por lo que el tiempo mínimo de exposición está dado por este valor.

Debido a que una holoimpresora de escritura directa utiliza un sistema óptico para la generación del hogel, la región en la que el haz objeto es enfocada sobre el medio de registro genera valores de intensidad altos, reduciendo fácilmente los tiempos de exposición al orden de 0.1 s.

### 3.1.2 Sistema electromecánico de desplazamiento

Para la exposición de cada uno de los hogels, es necesario desplazar el medio de registro tanto horizontal como verticalmente.

Para el sistema ópto-mecánico desarrollado, fueron implementados y alineados dos dispositivos de traslación lineal de 300 mm de longitud, que usan motores paso-paso y que son controlados desde la aplicación desarrollada en LabView “Estereoprinter 3.0”, descrita en la sección 3.1.3. En la Tabla 3 se muestran sus especificaciones técnicas.

Tabla 3. Especificaciones del dispositivo de traslación lineal LTS300 utilizado [47].

Descripción	Valor
Rango de desplazamiento (mm)	300
Velocidad horizontal máx. (mm/s)	50
Incremento mínimo posible ( $\mu\text{m}$ )	0.1
Capacidad de carga horizontal (kg)	15
Tipo de actuador	Motor paso-paso (Stepper Motor)

El desplazador electromecánico y el obturador son sincronizados con la aplicación Estereoprinter 3.0 para exponer cada uno de los hogels en la emulsión holográfica. Así, cuando el obturador está en su posición abierta, el desplazador se encuentra detenido, posterior al tiempo de exposición, el obturador se cierra y el desplazador XY es activado para desplazarse a una siguiente posición equivalente al tamaño del hogel. Una vez el desplazador XY se encuentra en su nueva posición, este es detenido y

se activa un tiempo de estabilización en el que no se realiza ninguna acción por ningún dispositivo del sistema. Este ciclo, el cual se ilustra en la Fig. 14, se repite por cada uno de los hogels.

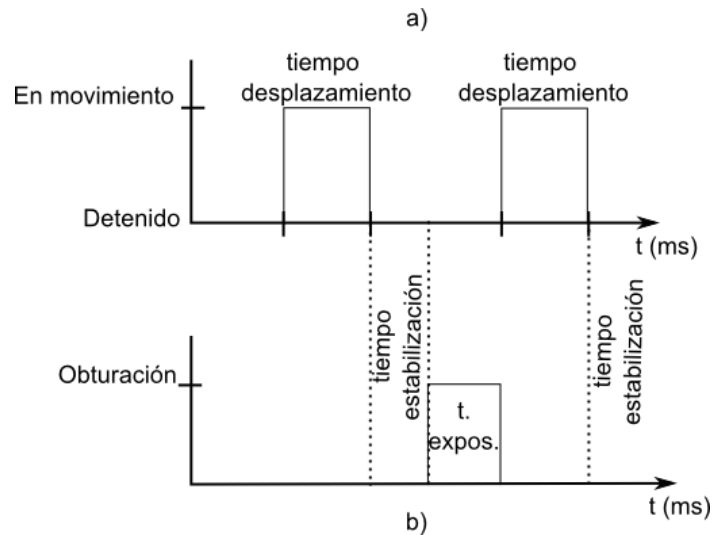


Fig. 14. Proceso de registro y desplazamiento de la placa holográfica. a) ciclo del desplazador XY, b) ciclo de obturación (t. expos: tiempo de exposición).

### 3.1.3 Interfaz de control y automatización

Con la interfaz *Estereoprinter 3.0* se controlan los diferentes elementos opto-mecánicos mencionados en las secciones anteriores, se establecen los parámetros de registro y se configura el LCD para la presentación de las imágenes hogel. La interfaz *Estereoprinter 3.0* se compone de las herramientas que se muestran en la Fig. 15.

La interfaz tiene 3 regiones principales: “Configuración inicial (antes de ejecutar)”, “Preparación” y “Proceso de registro”. La primera región ubicada en la parte superior izquierda, está dividida en dos partes. En la parte 1 se determina la carpeta donde se encuentran las imágenes hogels que serán registradas, establece su formato de imagen y permite definir la cantidad de imágenes a emplear. Estas a su vez corresponden a la cantidad de hogels que serán registrados

El cuadro 2, ubica un archivo .txt que contiene los tiempos de exposición de cada uno de los hogels a registrar, estos tiempos son tomados por la interfaz en el momento de ejecución del proceso de registro para el control del obturador mecánico.

### 3. Diseño e implementación de una holoimpresora

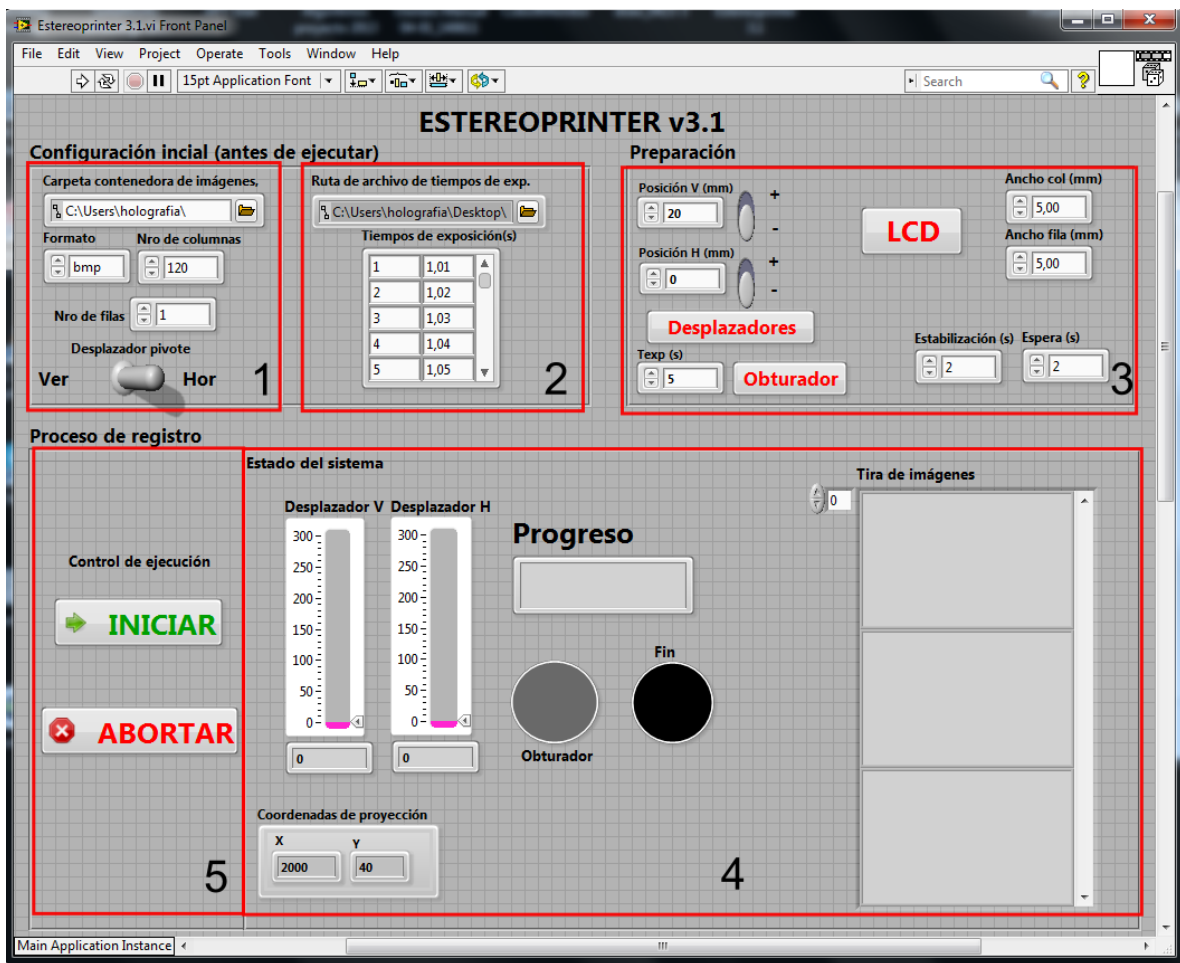


Fig. 15. Interfaz Estereoprinter 3.0 para el control y automatización de la holoimpresora.

En la segunda región de “Preparación”, cuadro 3, se establecen los parámetros de registro de la holoimpresora: la ubicación inicial y la dirección del movimiento del desplazador X-Y, la ubicación de la imagen hogel sobre el LCD y el tamaño de paso entre cada hogel a ser registrado. Adicionalmente, en esta región se estipulan los tiempos de estabilización entre cada registro del hogel y de un tiempo de espera previo a iniciar el proceso holográfico.

Por otro lado, el botón “Desplazadores” ubica el desplazador X-Y en la posición establecida por el usuario y el botón “Obturador” permite hacer pruebas de obturación como evaluación previa de las condiciones del sistema holoimpresora para el registro del EH-PC.

Por último, la región 4 llamada “Proceso de registro” permite visualizar el estado del sistema de registro y ejecutar o iniciar la síntesis del EH-PC. Como se muestra en el cuadro 4, el estado y la ubicación del desplazador X-Y pueden observarse a partir de las dos barras verticales que en esta se encuentra.

Finalmente, para iniciar o detener la síntesis del EH-PC con los datos y parámetros de registro establecidos en los cuadros 1, 2 y 3, se presionan los botones “Iniciar” o “Abortar” que se muestran en el cuadro 5.

### 3.1.4 Haz referencia

En la figura Fig. 16, se muestra los elementos ópticos que componen el haz referencia de la Fig. 12. Este haz debe ser configurado para incidir sobre el medio de registro desde el lado opuesto al que incide el haz objeto para formar un holograma de volumen, de esta forma son utilizados los espejos M5 y M6 para alinear el haz referencia y que coincida exactamente sobre el punto generado por el haz objeto.

El haz es expandido utilizando un expansor para iluminar una apertura Ar que es de mayor tamaño que el diámetro del spot del láser, el expansor de haz que se rige por la ecuación 2), debe tener un factor de magnificación  $M > 1$  para magnificar el tamaño del spot.

$$M = - \frac{\text{Distancia focal lente objetivo}}{\text{Distancia focal lente imagen}} \quad 2)$$

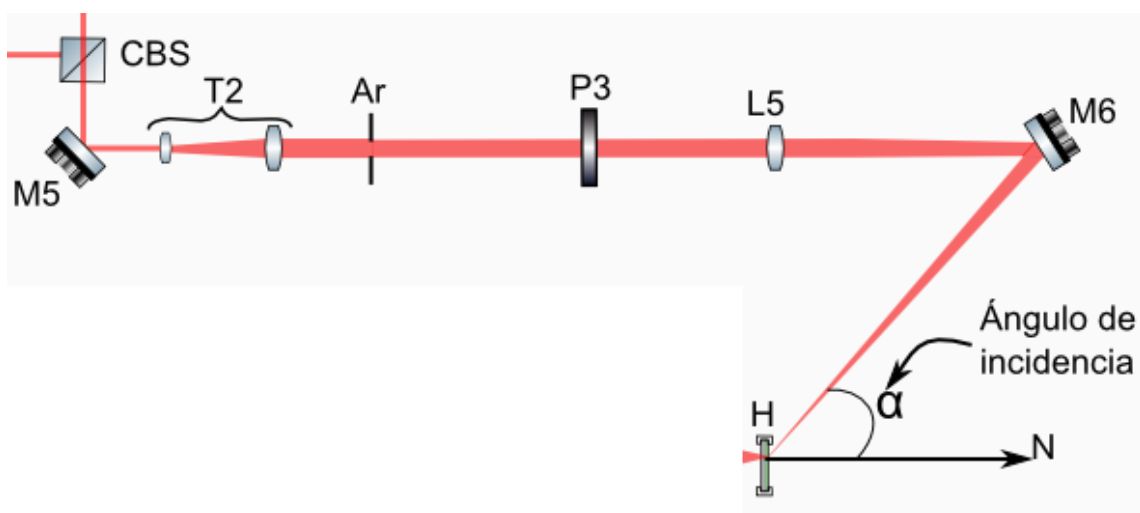


Fig. 16. Configuración óptica del haz referencia.

Para formar imagen de la apertura  $A_r$  sobre la emulsión holográfica, se posiciona un sistema formador de imagen luego de la apertura  $A_r$ , cuyo plano imagen coincide con la posición de la emulsión holográfica. De esta forma, para poder determinar la posición de la apertura usando un sistema óptico con distancia focal efectiva  $f$  y lograr un tamaño imagen igual al tamaño del hogel deseado  $y_{hogel}$ , se usa la ecuación 3).

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f} \quad 3)$$

Donde  $S_o$  es la distancia entre el plano objeto y el primer plano principal del sistema óptico,  $S_i$  la distancia entre el plano imagen y el segundo plano principal del sistema óptico y  $f$ , la distancia focal efectiva del sistema. Para lentes simples, los dos planos principales se encuentran en el mismo lugar.

El aumento transversal del sistema óptico utilizado, está dado por la ecuación 4).

$$M_T = \frac{y_{hogel}}{y_{apertura\_ref}} = -\frac{S_i}{S_o} \quad 4)$$

### 3.1.4.1 Ángulo de incidencia del haz referencia y el ángulo de Brewster

El espejo M6 es utilizado para alinear el haz referencia con el punto formado por el sistema óptico del haz objeto, sin embargo, este también es utilizado para cambiar el ángulo de incidencia  $\alpha$  sobre la emulsión holográfica, determinando así el ángulo de reconstrucción que debe ser utilizado por una fuente de luz blanca para reconstruir el holograma final. Este ángulo debe ser cuidadosamente elegido para evitar reflexiones internas en el vidrio que soporta el medio de registro y que pueden generar sobre exposiciones de los hogels o interferencias no deseadas que pueden afectar por completo el registro.

Para cambiar el ángulo de incidencia del haz referencia, el espejo M6 es desplazado a lo largo del eje óptico que incide sobre este y rotado para compensar la alineación. Es importante mencionar, que debe compensarse los caminos ópticos, ya sea cambiando el camino óptico del haz referencia o del haz objeto.

Una estrategia muy usada en la holografía analógica y que también es ampliamente utilizada en las holoimpresoras para evitar reflexiones internas sobre las superficies del material de registro, se basa

en utilizar el ángulo de Brewster, es decir, un ángulo de  $56^\circ$  [11][15].

### 3.1.5 Haz objeto y análisis sistema óptico de escritura

Entre las diferentes configuraciones posibles del haz objeto que permite el registro de los hogels a partir de las imágenes del LCD se ha optado por un sistema óptico más complejo que permita realizar en una misma configuración dos funciones [15][29]: formar imagen de la apertura sobre la emulsión holográfica y formar al mismo tiempo una imagen magnificada del LCD en un plano posterior a la emulsión holográfica.

Como se muestra en la Fig. 17, el haz objeto luego de ser reflejado por el cubo divisor de haz (CBS), es expandido por un expansor de haz para magnificar el spot del láser y poder iluminar por completo la apertura  $A_o$ , la cual se encuentra unida a un difusor para iluminar el LCD.

Obtener una distribución de intensidad homogénea en el haz objeto es importante en la formación del hogel, ya que así la exposición se dará de forma homogénea en la medida que la distribución de intensidad sobre el material de registro lo sea.

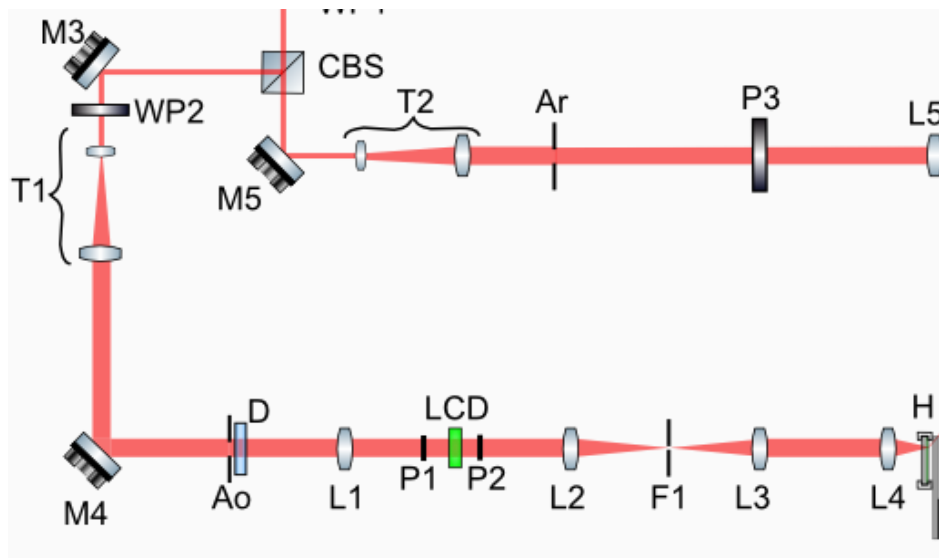


Fig. 17. Configuración óptica del haz objeto.

La apertura  $A_o$  tiene como función determinar la geometría y el tamaño del hogel, que a su vez debe coincidir con la geometría y tamaño del haz referencia. Para esto se utiliza un sistema óptico de tipo relay para formar imagen de esta apertura sobre el material de registro con el sistema de lentes L1, L2, L3 y L4, como se muestra en la Fig. 17, este sistema se analiza en las siguientes secciones.

Además, este mismo conjunto de lentes funciona también como un sistema óptico relay para el LCD para que finalmente con la lente L4, se forme imagen de este en un plano posterior al material de registro.

A continuación, se realiza una aproximación analítica al sistema compuesto por L1, L2, L3 y L4 en relación a la apertura  $A_o$  y el LCD.

### 3.1.5.1 Sistema de lentes L1 a L4 para la apertura $A_o$

Consideremos el esquema de la Fig. 18. El haz objeto es expandido y dirigido por el espejo M4 hacia la apertura física  $A_o$  y el difusor (D). La apertura  $A_o$  y el difusor (D) son puestos a una distancia  $a$  del sistema L1 cuya distancia focal efectiva se denota como  $f_1$ . Para que el haz de luz transmitido por la lente L1 sea colimado y pueda iluminar todo el LCD, se debe cumplir que  $a \cong f_1$ . El primer sistema relay está compuesto por el sistema 4f conformado por L1-L2, donde la lente L2 se encuentra a una distancia  $f_1 + f_2$  de la lente L1, de esta forma, el plano imagen I1 formado por el sistema L1-L2 se produce a una distancia  $f_2$  de la lente L2, siendo esta distancia su distancia focal efectiva.

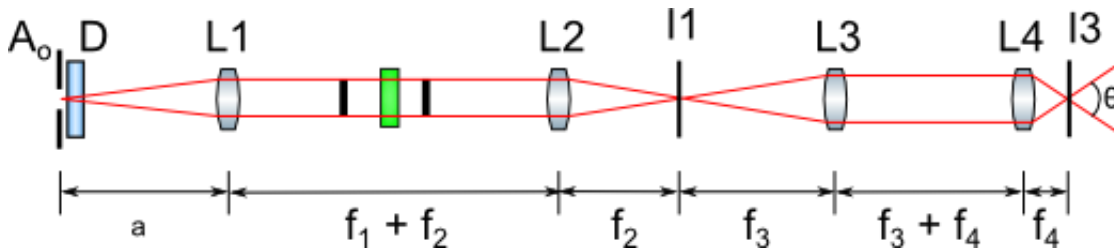


Fig. 18. Sistema óptico L1 a L4 para la formación de la imagen de la apertura  $A_o$ .

Se puede deducir fácilmente a partir de la ecuación 4), que la magnificación realizada por este sistema 4f está dada por la ecuación 5).

$$M_{1,2} = -\frac{f_2}{f_1} \quad 5)$$

Una vez formada la imagen real de la apertura  $A_o$  sobre el plano I1, esta se comporta ahora como objeto para el sistema relay compuesto por L3 y L4, por lo tanto, para el plano I1 que se encuentra a una distancia  $f_3$  del sistema óptico L3, siendo esta su distancia focal efectiva, y L4 que se encuentra

a una distancia  $f_3 + f_4$ , donde  $f_4$  es la distancia focal efectiva de L4, el sistema formará una nueva imagen real de Ao sobre el plano imagen I3 con una magnificación dada por la ecuación 6).

$$M_{3,4} = -\frac{f_4}{f_3} \quad (6)$$

Para una mejor formación del hogel, el plano I3 se hace coincidir con la placa holográfica H, permitiendo así una correcta alineación y una formación definida de la geometría y tamaño del hogel.

Finalmente, podemos determinar el tamaño de la apertura física requerida a partir del tamaño del hogel deseado, utilizando la magnificación total del sistema dado por la expresión 7) y 8).

$$M_T = M_{1,2}M_{3,4} = \frac{f_2f_4}{f_1f_3} \quad (7)$$

$$M = \frac{y_{hogel}}{y_{apertura\_obj}} = M_T \quad (8)$$

### 3.1.5.2 Sistema de lentes L2 a L4 para el LCD

Analicemos ahora el sistema L2 a L4 en relación al LCD, sistema que se muestra en Fig. 19. Como se mostró en el esquema de la Fig. 18, el LCD es iluminado por el haz colimado generado por la apertura Ao, el difusor (D) y la lente L1. El LCD se posiciona a una distancia  $b \approx f_2$ , de esta forma la lente L2 genera una distribución de la transformada de Fourier del LCD sobre el plano I1, que a su vez es modulado por la geometría de la apertura Ao. Las altas frecuencias de esta distribución son filtradas por una máscara que coincide en tamaño y geometría a la imagen real de la apertura Ao formada en el plano I1.

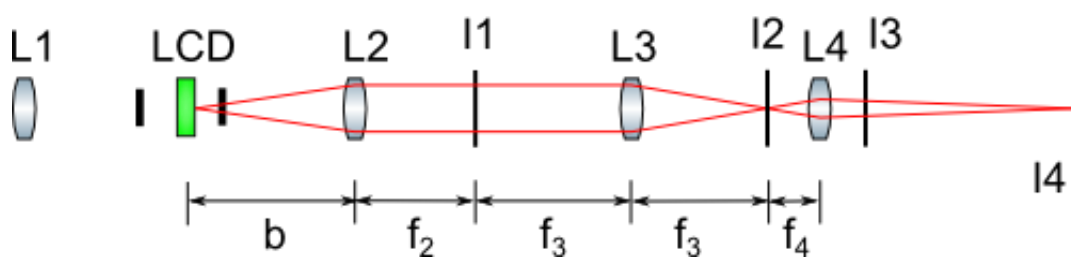


Fig. 19. Sistema óptico L2 a L4 en la formación de la imagen del LCD.

El sistema de lentes compuestos por L2 y L3, actúan como un sistema relay para la imagen presentada en el LCD, por lo que este sistema formará una imagen real sobre el plano imagen I2 con un factor de magnificación  $M_{2,3}$  determinado por la ecuación 9).

$$M_{2,3} = -\frac{f_3}{f_2} \quad 9)$$

De igual forma, la imagen real del LCD formada en el plano imagen I2, actúa como nuevo objeto para el sistema óptico de escritura L4, el cual genera una nueva transformada de Fourier sobre el plano I3 y a su vez, forma imagen magnificada y de campo visual grande en el plano I4 posterior al plano del holograma H.

Es en el plano I3 donde converge la imagen formada de la apertura  $A_0$  que determina la forma y tamaño del hogel y la transformada de Fourier del LCD con la información de paralaje codificada en una imagen bidimensional.

### 3.2 Diseño del sistema óptico de la holoimpresora

La configuración mostrada en la Fig. 12 puede obtenerse con un sistema de lentes simples. Inicialmente, como validación del sistema se utilizaron las lentes descritas en la Tabla 4.

Tabla 4. Detalles ópticos de las lentes simples utilizadas en la configuración del haz objeto.

Lente del sistema	Referencia de proveedor	Distancia focal (mm)	Diámetro (in)	Proveedor
L1	LB1374	160mm	2"	Thorlabs
L2	LB1630	100mm	2"	Thorlabs
L3	LB1630	100mm	2"	Thorlabs
L4	LB1811	35mm	1"	Thorlabs

Bajo esta configuración el campo visual máximo logrado por la lente L4 para el registro del hogel es de 20°. El LCD empleado fue obtenido de un proyector convencional (video beam) Sanyo PLC-SU10,

de tipo matriz activa TFT (Transistor de película delgada) con una resolución de 804 x 604 píxeles [51].

Este sistema implementado, presentaba limitaciones en todas las características necesarias para la producción de EH de alta calidad. Como se estudió en las secciones 2.2 y 2.3, generar una mejor experiencia visual de un EH depende de la apertura numérica del sistema óptico de registro, en cuyo caso del sistema L4, para producir EH con grande campo visual; de moduladores espaciales de luz (SLM) de alta resolución para generar una mejor percepción de paralaje y de SLM con alto rango dinámico, que permita un alto rango de variaciones de intensidad por cada imagen presentada en el modulador.

En cuanto a su sistema óptico de escritura L4, está compuesto por una única lente simple de distancia focal corta y que produce un campo máximo visual (FOV) de 20°, limitando el ángulo visual de la imagen 3D reconstruida por un EH a este mismo ángulo. Es importante considerar al ser L4 una lente simple, se encuentra sujeta bajo aberraciones y distorsiones que afectan significativamente la calidad de la imagen 2D.

Usualmente el FOV de un EH debe ser lo suficientemente grande si se desea ver el holograma desde diferentes puntos de vista y corregidos para compensar las aberraciones y distorsiones producidas normalmente por lentes de gran apertura numérica. Los sistemas comerciales logran actualmente ángulos entre los 90° y los 105° y son diseñados para compensar principalmente la aberración esférica y la distorsión de cojín [15][29].

Para el caso del LCD implementado, cuenta con una resolución de 804 x 604 píxeles y una relación de contraste 250:1. Los sistemas comerciales, pueden llegar a utilizar LCD HD desde los 1920 x 1080 píxeles y con relación de contraste superiores a los 2000:1 [15].

El diseño de sistemas ópticos de alta apertura numérica con la menor cantidad de aberraciones posibles y del uso de mejores tecnologías son necesarios para la creación de EH de alta calidad visual para generar la experiencia tridimensional más realista posible.

#### **3.2.1 Optimización e implementación del sistema óptico**

Uno de los principales retos de estos sistemas es diseñar un sistema óptico de FOV grande que genere la transformada de Fourier sobre el medio de registro y que además genere una imagen magnificada del LCD sobre un plano imagen posterior a la emulsión holográfica con la menor cantidad de

aberraciones posibles. Desafortunadamente, a medida que la apertura numérica de un sistema óptico aumenta, sus aberraciones ópticas incrementan afectando la formación de la luz generada en el hogel y la calidad de la imagen presentada en el LCD.

Como ya se dijo, la implementación realizada y descrita en la sección anterior, no es la solución óptima para ser usada en un sistema holoimpresora y por eso, debe realizarse grandes esfuerzos en diseñar un sistema óptico que satisfaga estas condiciones.

Partiendo de la propuesta planteada por Tapsell [29], se evaluaron en Zemax, ocho configuraciones de los sistemas L1 a L4 compuestos por diferentes tipos de lentes comerciales que fueron seleccionadas y dentro de las cuales se encuentran lentes sencillas, dobletes, lentes cóncavas y lentes convexas. Para la obtención de un diseño óptimo fue posible modificar parámetros como: las distancias entre las lentes, el tipo de lente convexa/cóncava/doblete/simple y el diámetro de las lentes, optimizando así, la configuración bajo la cual el sistema óptico de escritura presentara una apertura numérica grande y con la menor cantidad de aberraciones y distorsiones.

De los diferentes sistemas evaluados en Zemax [48], en la figura Fig. 20, se ilustra el diseño final desarrollado y optimizado para una fuente de luz de longitud de onda  $\lambda = 633$  nm. En este se muestra un trazado de rayos realizado desde el plano del LCD hasta el plano imagen I4, este último generado por el sistema de lentes L4.

Debido a que la lente L1 no contribuye significativamente en la calidad de la imagen formada del LCD, esta lente no es considerada en el análisis presentado en la Fig. 20.

El sistema óptico fue diseñado para generar una imagen ligeramente magnificada en el plano I1, para luego ser demagnificada por los sistemas L3 y L4 y así formar el hogel. Esto permite que el tamaño del hogel puede variarse cambiando el tamaño de la apertura  $A_o$ , que puede ser fabricada a partir de una máscara de diferentes tamaños.

Como se puede observar en Fig. 20, los rayos marginales de color verde y rojo que son producidos por las regiones extremas del LCD, son los más afectados por el sistema óptico de escritura de alta apertura numérica L4, presentando para este caso distorsión de cojín. Esta distorsión puede ser disminuida para el sistema propuesto, disminuyendo el tamaño del LCD o generando una imagen demagnificada sobre el plano I2 antes del objetivo de escritura L4.

En este diseño final, la lente L4 es concebida como un sistema de lentes que debe satisfacer las exigencias del sistema óptico de escritura. Como se ilustra en Fig. 21, está conformado por 7 lentes

configuradas para enfocar el haz objeto progresivamente hacia el plano I3, donde se encuentra el material de registro. Este sistema, fue optimizado para disminuir principalmente la aberración esférica y la distorsión de cojín que se presenta por los rayos marginales del sistema.

Con la optimización realizada se obtuvo un sistema óptico con una distancia focal posterior de 5.4 mm y una apertura numérica  $NA = 0.5$ .

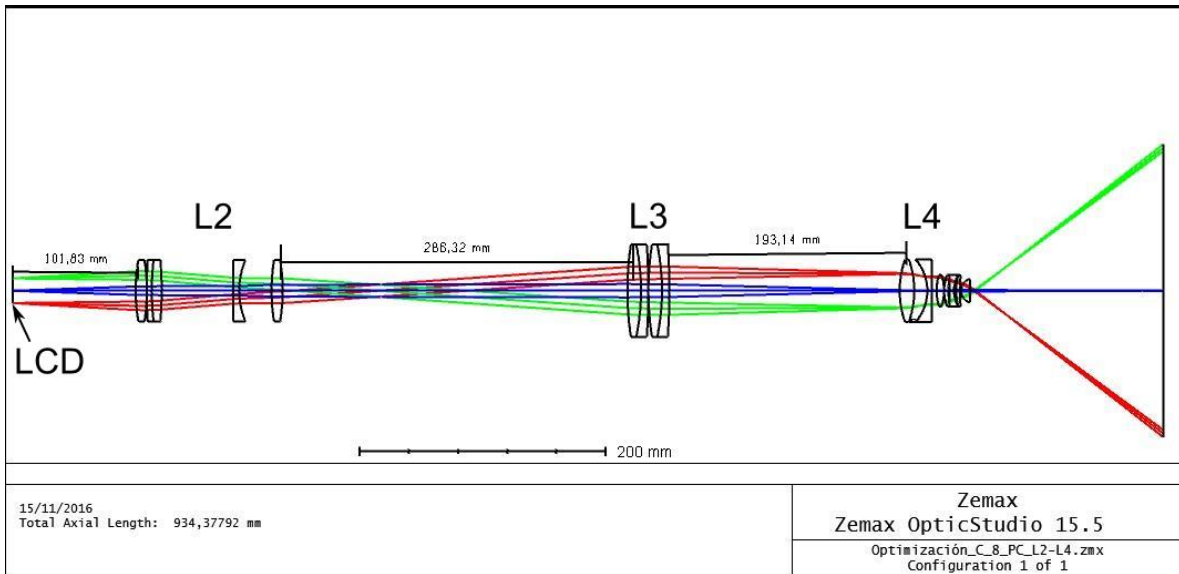


Fig. 20. Sistema óptico diseñado en este trabajo. En imagen se muestra un trazado de rayos realizado en Zemax para evaluar el sistema. De izquierda a derecha: plano LCD, sistema L2, sistema L3, sistema L4 y plano imagen LCD I4.

En resumen, bajo la configuración del sistema óptico diseñado es posible registrar EH con un FOV de  $60^\circ$  para la percepción de una mayor cantidad de perspectivas de una escena 3D, logrado por el aumento en la apertura numérica de la lente compuesta L4; la variación del tamaño de hogel a partir del uso de diferentes tamaños de máscaras posicionadas en  $A_o$  y que debido a la relación de las distancias focales efectivas de las lentes L1 a L4 es posible demagnificar mejorando la resolución espacial de los EH y finalmente, el sistema óptico es diseñado y optimizado para compensar las aberraciones esféricas, la distorsión de cojín presentada por los rayos marginales del LCD y mejorar la distribución de intensidades presentada en el plano imagen I4.

Finalmente, para su real implementación es evaluado el sistema óptico bajo condiciones de ensamblaje, con lo que se valida la posibilidad del diseño de ser implementado, a partir del modelado y ensamblado de las monturas ópticas acorde a la longitud y diámetros del sistema óptico, para esto

fue utilizado el software CAD Solidworks.

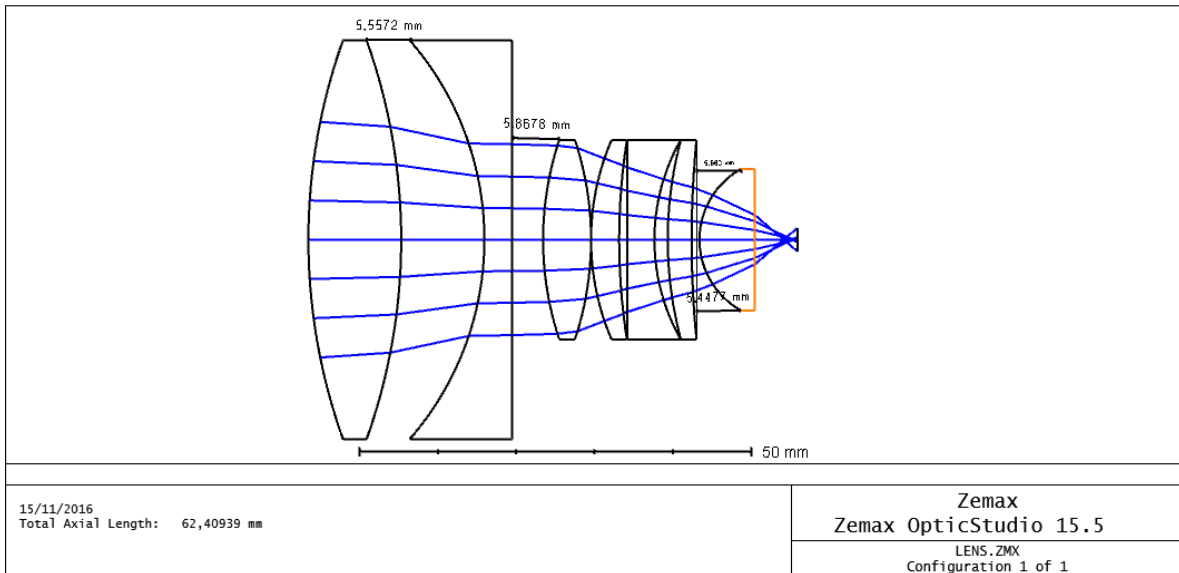


Fig. 21. Sistema óptico L4 diseñado en este trabajo para la escritura de hogels de campo visual amplio. El sistema está compuesto por 7 lentes que fueron optimizados con el software Zemax.

El LCD, fue elegido de manera que mejorara la calidad de las imágenes hogels a ser registradas bajo las condiciones del diseño óptico desarrollado, influyendo características como su tamaño, resolución, tamaño de pixel y la relación de contraste.

Este es un LCD de marca Epson de 12 bit de tipo twisted nematic de tamaño 1,3", resolución 1920 x 1080 pixeles y tamaño de pixel de  $15 \mu\text{m}$ , Fig. 22.

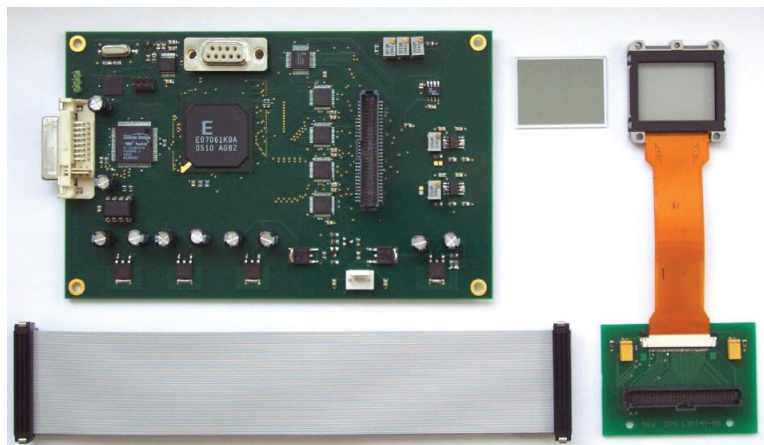


Fig. 22. LCD implementado para el nuevo sistema holoimpresora diseñado. Kit compuesto por LCD, dos polarizadores, cables y tarjetas de control.

#### 3.2.2 Evaluación experimental de la holoimpresora

Para evaluar el rendimiento de la nueva holoimpresora, fueron comparados dos EH bajo las mismas condiciones de registro.

Se registraron en cada uno de los EH 10.000 hogels, cada uno registrado bajo la configuración descrita en la sección 3.1. Para el EH registrado a partir de la holoimpresora compuesta por el sistema de lentes de la Tabla 4, se obtuvo una ventana de visualización con un campo visual de  $20^\circ$ , esto limitó la cantidad de cambios de perspectiva percibidas por un observador a una limitada porción del objeto tridimensional. Si bien el resultado obtenido posibilita generar una experiencia estereoscópica, las limitaciones de reconstrucción debido a las restricciones del sistema de registro implementado dificulta la interpretación del modelo 3D exhibido en la imagen 3D. Adicionalmente, este presenta de forma aleatoria diferentes hogels sin eficiencia de difracción, por lo que la información paraxial registrada no es reconstruida completamente, afectando notoriamente la calidad de la imagen 3D percibida por el observador.

Por otro lado, el EH registrado por la holoimpresora con el nuevo diseño óptico, reconstruye la información de paralaje de la escena 3D entre un campo visual de visualización de  $60^\circ$ . Además, las condiciones de registro generadas por el nuevo sistema, generan una reconstrucción holográfica con distribuciones de intensidades homogéneas posibilitando una cómoda y fácil percepción, por parte de un observador, de detalles de la escena 3D como su geometría, texturas, y cambios de intensidad que son generados debido a la relación de contraste y resolución del nuevo LCD implementado.

Como se describe en el capítulo 5 y con las imágenes obtenidas por los desarrollos del capítulo 4, se prueba la capacidad de los EH obtenidos bajo el sistema diseñado e implementado para generar experiencias visuales 3D de alto impacto.

## **4 Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos**

El sistema óptico implementado, tal como se analizó en las secciones 2.2 y 2.3, determinan la forma en que la información de paralaje es almacenada y presentada a un observador. Partiendo del sistema óptico, es necesario desarrollar un método para la adquisición de esta información de manera que satisfaga las condiciones impuestas por dicho sistema.

Un EH codifica la información de profundidad y paralaje de las escenas 3D de forma implícita a partir de información provista por imágenes que son registradas en los hogels [3]. La adquisición de esta información y registro de un EH presenta grandes retos de optimización que deben ser solucionados para obtener de forma rápida una gran cantidad de imágenes de alta resolución y registrar la mayor cantidad de hogels en la menor cantidad de tiempo posible. De esta forma, el éxito de un EH no solo radica en el diseño e implementación de la holoimpresora descrita en el capítulo anterior, sino también, de los algoritmos implementados para la adquisición de la información visual que satisfaga las restricciones geométricas impuestas por este sistema y que sean generadas con una alta rapidez y con el menor costo de almacenamiento posible.

Por otro lado, los displays 3D han ganado mayor interés por los espectadores no solo por su capacidad

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

de reconstruir la profundidad de los objetos, sino también, por su capacidad de generar imágenes que parezcan flotar en el espacio por fuera de la pantalla del display y permitir la interacción espacial entre el observador y la reconstrucción tridimensional de una escena 3D [15][49]. Estas imágenes se pueden obtener de manera satisfactoria con la holografía analógica utilizando la técnica de hologramas plano imagen, en donde un holograma H2 es registrado a partir de la imagen real generada por un primer holograma H1 y el sistema óptico es configurado para que el holograma H2 se encuentre atravesando el objeto o incluso detrás de este una vez este holograma es reconstruido [11][12][13]. Un esquema de la configuración óptica implementada para el registro de un holograma analógico plano imagen se muestra en Fig. 23.

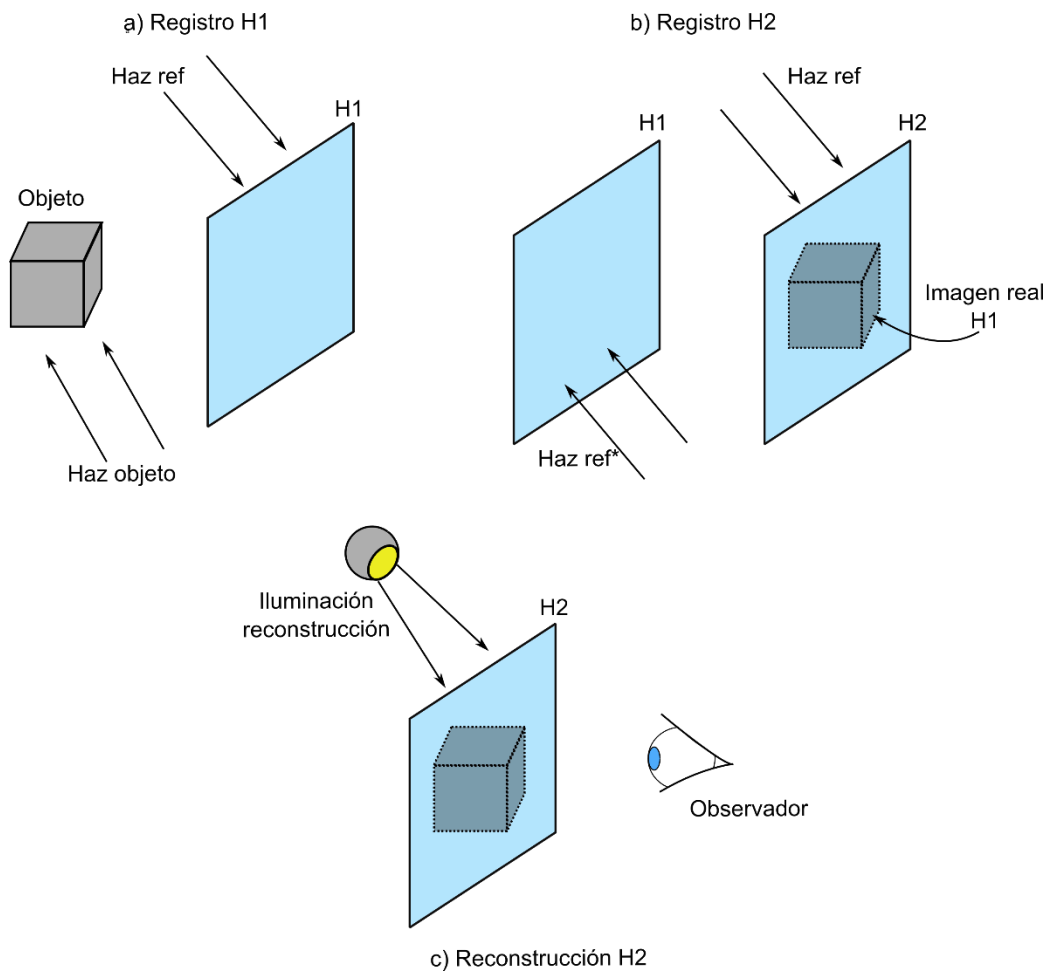


Fig. 23. Registro de un holograma analógica plano imagen. a) registro holograma H1, b) Registro holograma H2 y c) reconstrucción holograma H2.

Para el caso de los EH, se han implementado configuraciones similares a las propuestas por la

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

holografía analógica, tal es el caso de los EH generados a partir de dos pasos [15][50][32]. Un primer holograma H1 es registrado con la información presentada en el LCD que posteriormente es usado para registrar un segundo holograma H2, el cual se ubica en un plano a través de la información de la escena 3D. Cuando es reconstruido el holograma, se obtiene una imagen 3D por fuera y por dentro de la placa de registro utilizada, esto es, parte de la imagen es real y parte es virtual [15]. Ver Fig. 24.

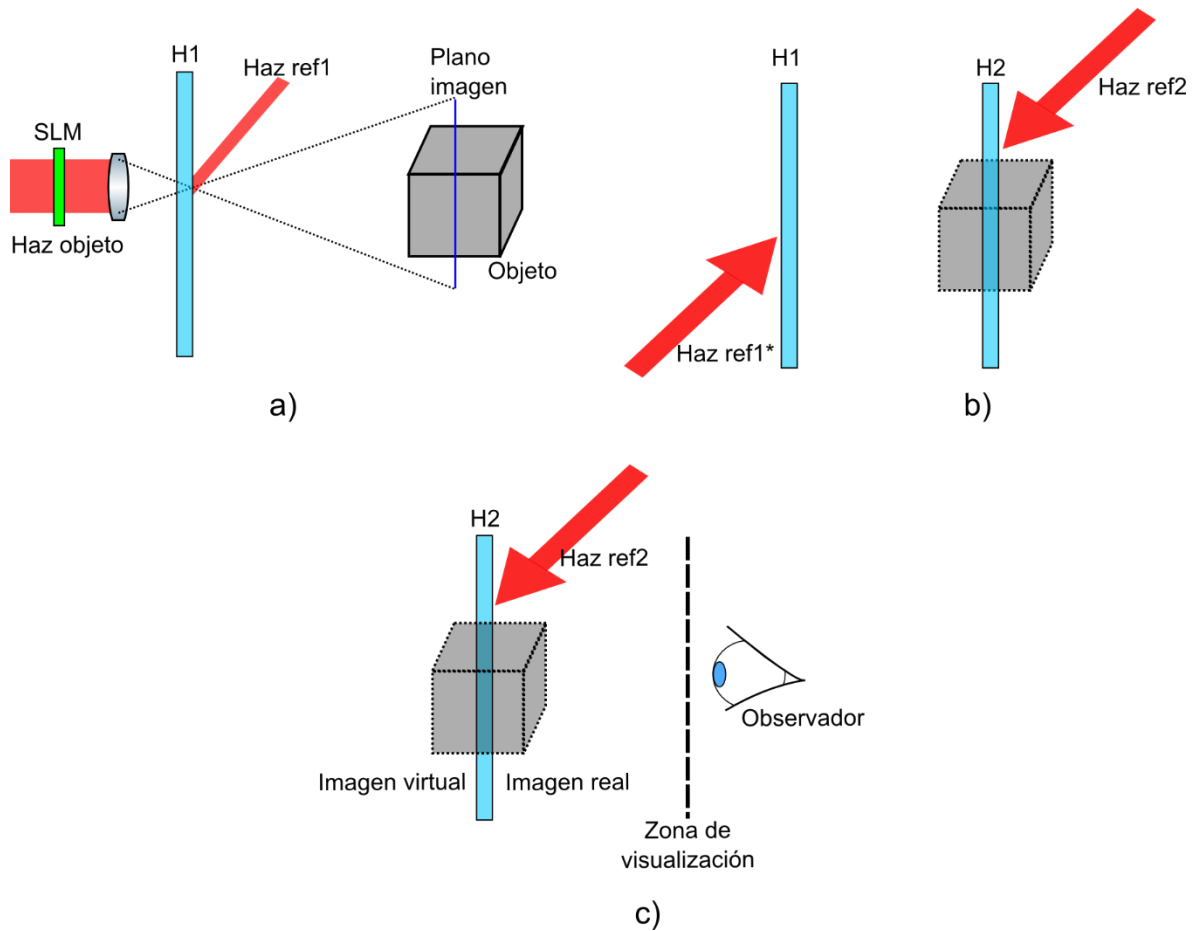


Fig. 24. Registro de un EH plano imagen a partir de una configuración de registro de dos pasos. a) Registro holograma H1, b) Registro holograma H2 y c) reconstrucción holograma final H2.

Sin embargo, para el caso de EH de escritura directa, la estrategia usada por la configuración de registro de dos pasos no puede ser implementada y es necesario entonces, proponer un método computacional que permita generar información de profundidad y paralaje para generar imágenes 3D, en un solo paso, de una escena que se pueda percibir tanto por fuera como por dentro de la placa de registro, tal como se ilustra en Fig. 25.

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

---

En resumen, un algoritmo para la adquisición de las imágenes que deben ser usadas en el registro de un EH de un solo paso debe satisfacer un conjunto de condiciones impuestas por la configuración óptica implementada y por un conjunto de preferencias que permitan obtener el mejor rendimiento de la holoimpresora y generar la experiencia visual deseada.

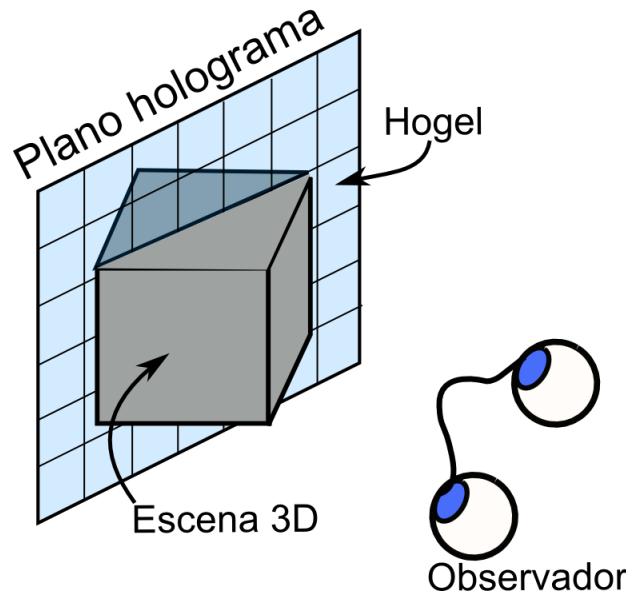


Fig. 25. Imagen 3D producida por un EH-PC con información de la escena 3D por fuera (imagen real) y por dentro (imagen virtual) del material de registro.

Este capítulo, describe y analiza diferentes métodos computacionales que pueden ser implementados para la adquisición de las imágenes acorde al sistema óptico elaborado, y son descritos los diferentes pasos requeridos para su implementación, además propone una metodología, el método de doble cámara truncada, que permite adquirir de una manera más eficiente el conjunto de imágenes requeridas para el registro de un EH-PC.

#### 4.1 Clasificación de los métodos para la generación de imágenes hogel

Con los primeros desarrollos de la estereoscopia holográfica, estas imágenes eran capturadas por un conjunto de cámaras fotográficas configuradas horizontalmente, obteniendo así un conjunto de imágenes de perspectivas de una escena 3D que posteriormente eran registradas por una configuración óptica de hologramas sintéticos de dos pasos [51][15]. Posteriormente, con el desarrollo de la computación gráfica, los métodos de adquisición fueron mejorados y optimizados a partir de un modelo de generación de imágenes basados en el modelo físico de una cámara de pinhole,

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

registrando computacionalmente una imagen en un conjunto discreto de píxeles [3][52][53][30][19].

Actualmente, tanto la implementación física de cámaras fotográficas reales, como del uso de cámaras virtuales utilizando softwares de computación gráfica son empleados [43], sin embargo, ninguna de estas dos implementaciones satisface de manera directa las necesidades de un sistema de impresión de hologramas por escritura directa. Por el contrario, es estrictamente necesario realizar adaptaciones a estos modelos para ajustar la información generada a los requerimientos óptico geométricos de los EH.

Para entender los principios de las diferentes aproximaciones para la generación de las imágenes hogels, consideremos el modelo general presentado en la Fig. 26, cada uno de los hogels que componen el EH actúan como un emisor direccional de luz, en el que cada rayo de luz emitido puede caracterizarse por diferentes niveles de intensidad y color. El hogel delimita por su cono de emisión (campo visual FOV) la cantidad de rayos posibles que pueden ser generados sobre la ventana de visualización. Por otro lado, para un observador que se encuentre en una posición específica sobre la ventana de visualización, interceptará para cada hogel un único rayo de luz con la información de intensidad y de color registrada previamente. Bajo esta condición, cada ojo del observador percibirá una única imagen 2D con información de una perspectiva de la escena 3D en cada punto de visión sobre la ventana de visualización, generando así la percepción de disparidad y estereopsis en el observador.

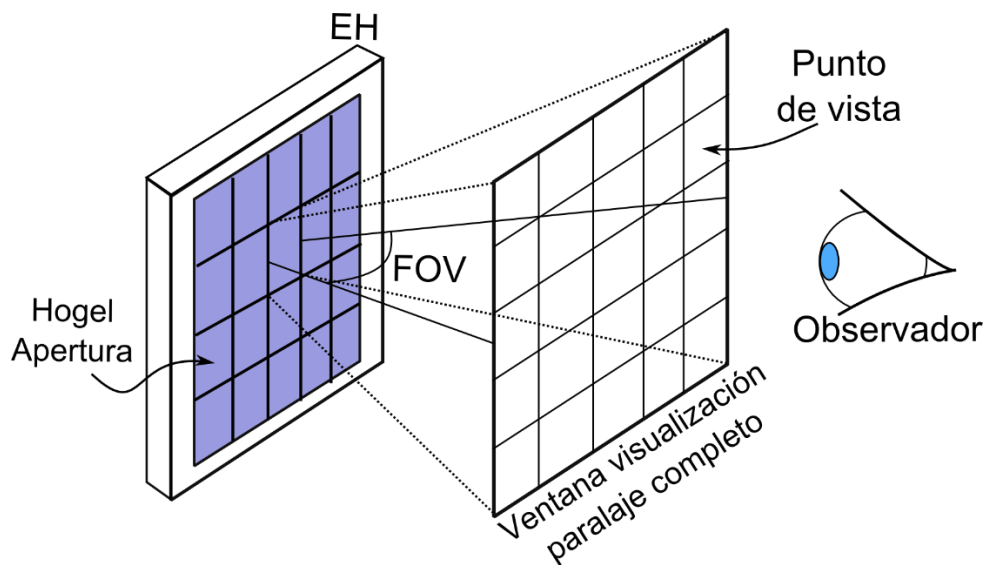


Fig. 26. Modelo simplificado de un EH-PC como display de paralaje.

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

De forma general, para generar la información tridimensional en un EH se requiere calcular la apariencia de cada uno de los hogels percibidos de dos formas posibles a) desde los **puntos de vista** del observador y b) desde las **aperturas** del EH [15]. Para el primer caso, el plano del holograma y la ventana de visualización corresponden a un plano imagen y a un plano cámara sobre los que se registra la información de las diferentes perspectivas de una escena 3D percibidas desde los puntos de vista, tal como se esquematiza en Fig. 27 [52][15][30][19]. Y para el segundo caso, los hogels corresponden a las aperturas del EH los cuales delimitan la información que es presentada por este y de esta forma, es en este lugar en el que debe adquirirse la información emitida por el hogel [54][53]. Este modelo se esquematiza en la Fig. 28.

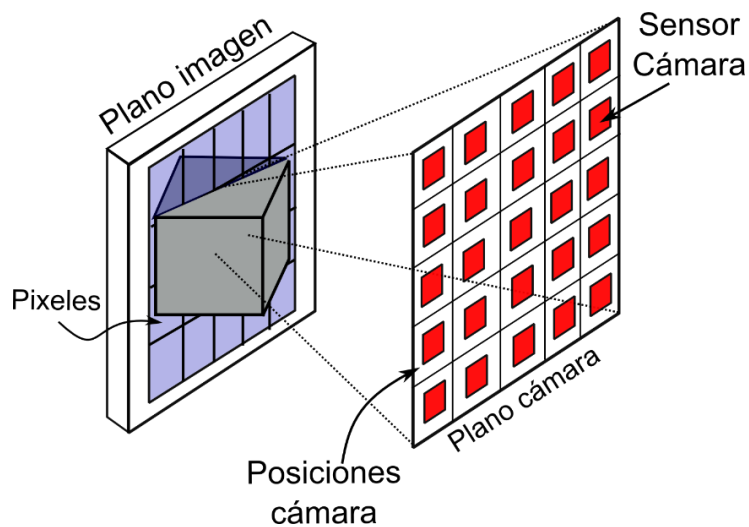


Fig. 27. Generación de imágenes hogel basado en imágenes de perspectivas capturadas en los puntos de vista del observador.

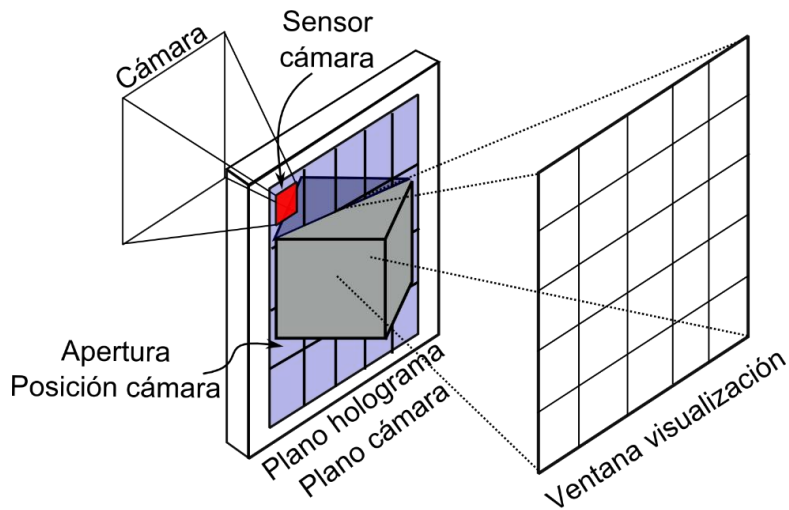


Fig. 28. Generación de imágenes hogel basado en imágenes capturadas en cada apertura del EH.

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

Este trabajo propone una clasificación para las diferentes configuraciones propuestas para la generación de las imágenes hogels, clasificadas según el lugar en que son calculadas las apariencias de los hogels y el tipo de imagen 3D que producen en el momento de reconstruir el EH, esta clasificación se muestra en Fig. 29.

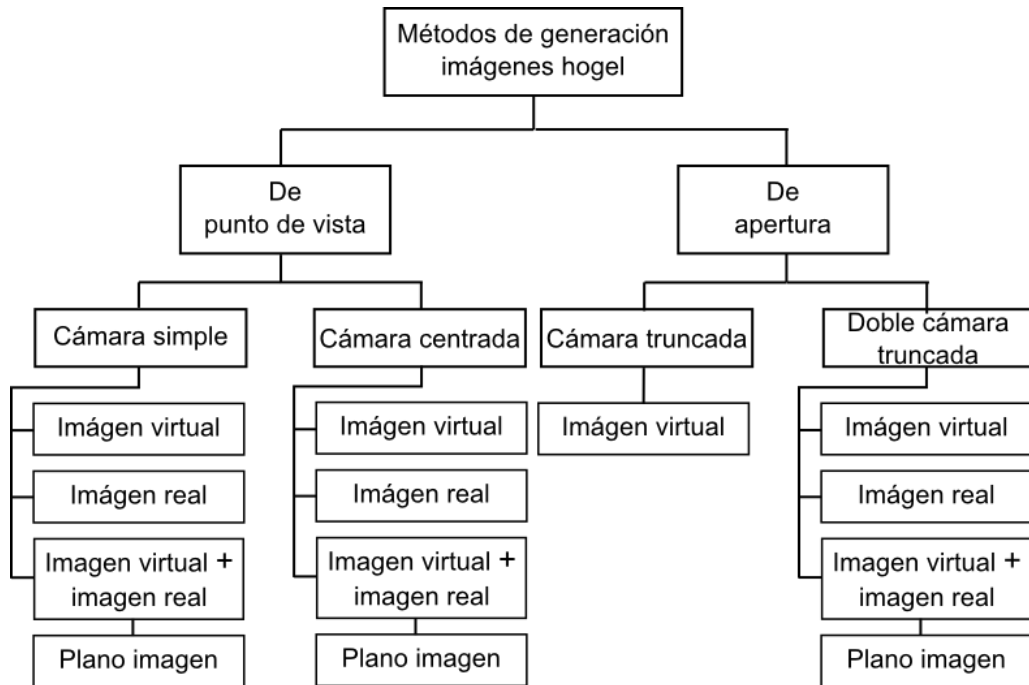


Fig. 29. Clasificación métodos para la generación de imágenes hogels.

Cada uno de las aproximaciones descritas anteriormente requieren del desarrollo de algoritmos que ajusten los modelos acordes a las restricciones geométricas impuestas por el sistema óptico de registro y debido a la cantidad de información requerida, estos algoritmos deben ser optimizados, brindando para cada aproximación ventajas y desventajas que deben ser tomadas en cuenta dependiendo de la aplicación o implementación que se desee desarrollar.

#### 4.2 Métodos de punto de vista

Los métodos de puntos de vista se basan en utilizar por cada punto de vista sobre la ventana de visualización, una cámara fotográfica real o virtual para capturar un conjunto de perspectivas de la escena 3D que serán utilizadas posteriormente para generar el conjunto de imágenes hogels que serán registradas[15][52][19]. Existen dos métodos, los cuales difieren de la forma en que es configurada la cámara usada para la adquisición de la información de perspectivas de la escena, pero se basan en

el mismo principio de generación de las imágenes hogels: realizar una transformación sobre los píxeles de las imágenes de perspectivas [15][30].

#### 4.2.1 Cámara simple

El primer método, denominado método de cámara simple, se basa en una cámara dirigida hacia un plano imagen con un campo visual (FOV) fijo y con dirección de visión perpendicular a este plano. La cámara es desplazada tanto horizontal como vertical sobre un plano de la cámara para producir un EH-PC, capturando para cada posición discreta una perspectiva de la escena 3D. Debido a su configuración geométrica, este método requiere de cámaras con un gran campo visual que no puede ser obtenido a partir de cámaras fotográficas reales, de esta forma, deben ser usados softwares de computación gráfica para generar cámaras virtuales, modelo basado en el modelo físico de cámara pinhole [15][29].

En la Fig. 30, se ilustra la geometría de esta configuración en relación al sistema de registro óptico utilizado. En este esquema de integración entre el sistema óptico de registro y la configuración para la adquisición de las imágenes con cámara simple, el plano del holograma  $H$  de dimension horizontal  $W_{holo}$  y dimensión vertical  $H_{holo}$ , para los métodos de punto de vista, corresponde para la cámara, al plano imagen definido como  $I$  con dimensiones  $W_{imag}$  y  $H_{imag}$  en unidades dadas en píxeles. De esta forma, la relación entre estos dos planos está dada por la ecuación 10).

$$\begin{aligned} W_{holo} &= W_{imag} \\ H_{holo} &= H_{imag} \end{aligned} \tag{10}$$

Cada uno de los hogels, posee un plano  $S$  el cual contiene la información de profundidad y de paralaje que fue registrado previamente por la holoimpresora, y que posee dimensiones  $W_{LCD}$  y  $H_{LCD}$  en píxeles, correspondiente al tamaño del SLM utilizado.

Utilizando un modelo de trazado de rayos, se puede observar que para un conjunto de píxeles (líneas de color verde) del plano  $S$  contenido en un solo hogel, produce sobre el plano de visión ( $V$ ) una determinada cantidad de puntos de vista la cual se encuentra delimitada por el ángulo  $\theta$  del FOV de cada uno de los hogels. El método de cámara simple, busca entonces posicionar sobre cada uno de estos puntos de vista, una cámara para registrar la información de la escena 3D bajo las condiciones geométricas del sistema de registro. Es por esto que el plano de visión y el plano de la cámara coinciden.

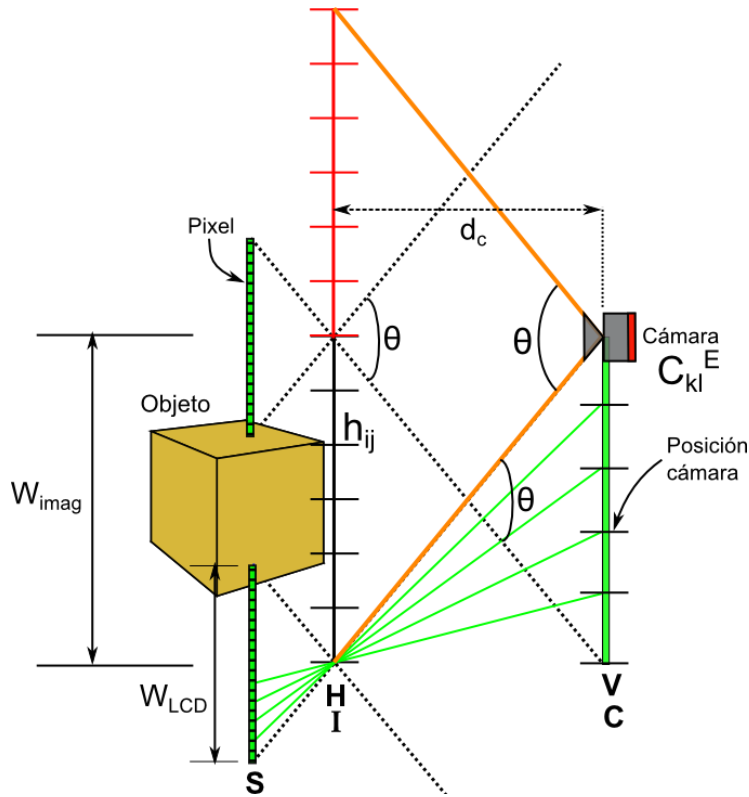


Fig. 30. Configuración geométrica del método de cámara simple.

Para analizar el modelo, consideremos únicamente el caso para un EH-PH, reconociendo que el método puede ser fácilmente aplicado al caso EH-PC.

Para un correcto ajuste del modelo, se requiere satisfacer un conjunto de condiciones:

1. La cámara es configurada para que su campo visual coincida con el campo visual del hogel, que a su vez es determinado por el objetivo de escritura. De esta forma no se adquiere información que no es necesaria en el proceso de generación de la imagen hogel.
2. Bajo la configuración anterior, cuando la cámara se ubica en los extremos izquierdo/derecho del plano cámara C, la escena 3D se ajusta exactamente en la mitad derecha e izquierda de la imagen renderizada.
3. La cámara es desplazada horizontalmente, EH-PH, entre los dos extremos mencionados en el ítem anterior.

Para que las condiciones anteriores se satisfagan correctamente, el plano de la cámara debe ser posicionado a una distancia  $d_c$  desde el plano del holograma, determinado por la ecuación 11), donde

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

---

$\Delta x$  define el tamaño del hogel registrado sobre el plano H.

$$d_c = \frac{W_{imag} * \Delta x}{\tan(\theta/2)} \quad (11)$$

A esta distancia  $d_c$ , cada imagen  $C_{k,l}^E$ , donde los subíndices  $k, l$  definen las posiciones de la cámara y el superíndice  $E$  es el marcador empleado para identificar este conjunto de imágenes, corresponden en tamaño a  $2W_{imag}$  pixeles. En la Fig. 31, se ilustra una imagen de este tipo, en la que se puede ver una escena compuesta por un cubo contenido dentro de un marco de color blanco, este marco corresponde al plano  $H$  e  $I$  ilustrados en la Fig. 30. Para obtener la información de la imagen hogel, la imagen  $C_{k,l}^E$  debe ser recortada al tamaño  $W_{imag}$ , generando un nuevo conjunto de imágenes perspectivas  $C_{k,l}$ . De esta forma, es necesario aplicar una máscara de corte, la cual genere este nuevo conjunto de imágenes cada una con un número entero de pixeles. Así, se evita asignar tiempo de computo en realizar una interpolación para el ajuste de los tamaños de las imágenes.

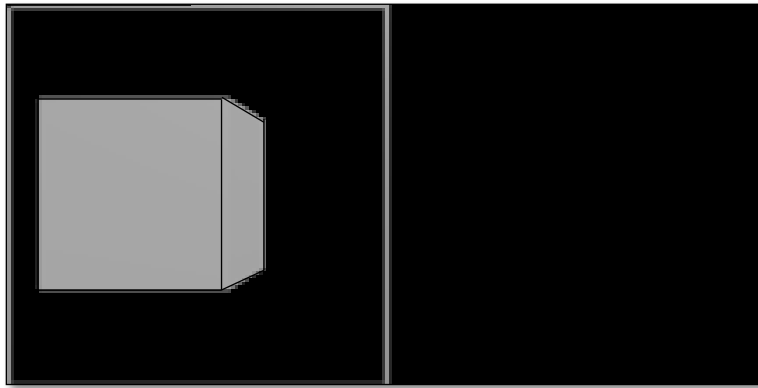


Fig. 31. Imagen perspectiva extendida obtenida por la configuración de la cámara del método de cámara simple.

En este sentido, es necesario desplazar la máscara de corte sobre las imágenes expandidas un número entero de pixeles  $k$ , por cada posición de captura. Para que este proceso se cumpla satisfactoriamente, es necesario imponer la condición dada por la ecuación 12), la cual plantea que el tamaño  $W_{imag}$  del plano imagen  $I$  debe ser igual a un múltiplo de un valor entero  $k$  de la cantidad de imágenes capturadas sobre el plano cámara.

$$N_{imag} = W_{imag}/k \quad \text{para } k \in \mathbb{N} \quad (12)$$

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

---

Adicionalmente, como se muestra en la Fig. 30, los rayos (líneas de color verde) generados por el plano S (LCD) dentro del campo visual del hogel interceptan el plano C en diferentes posiciones, lo que corresponde a diferentes posiciones de la cámara sobre este mismo plano. En este sentido, la información contenida en el plano S está compuesta por un pixel de información de cada una de las capturas  $C_{k,l}^E$  realizadas por la cámara. De esta forma, este modelo puede simplificarse considerando que la resolución horizontal del LCD es proporcional a un múltiplo entero de veces  $m$  la cantidad de imágenes que debe capturar la cámara. Esta restricción puede definirse por la ecuación 13).

$$W_{LCD} = mN_{imag} \quad ; m \in \mathbb{N} \quad 13)$$

A partir de las ecuaciones 10) a 13), es posible implementar un algoritmo para producir las imágenes perspectivas  $C_{k,l}$ , con la información contenida dentro del plano imagen  $I$  usando las imágenes perspectivas expandidas  $C_{k,l}^E$ . En la Fig. 32 se ilustra un ejemplo de una imagen perspectiva  $C_{k,l}$  obtenida a partir de la imagen expandida  $C_{k,l}^E$ .

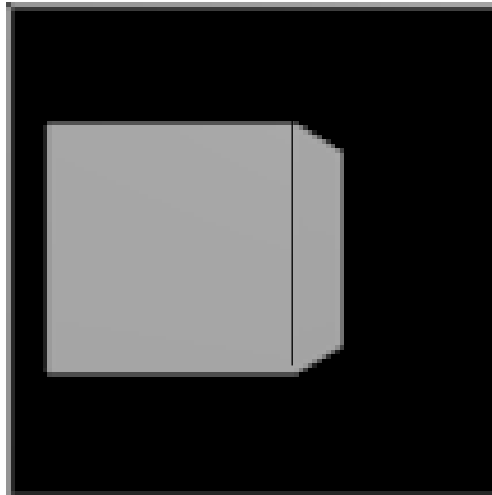


Fig. 32. Imagen perspectiva recortada  $C_{k,l}$ , obtenida de la imagen perspectiva extendida  $C_{k,l}^E$ .

Ahora, para la generación de las imágenes hogels  $h_{i,j}$ , donde los subíndices  $i, j$  corresponden a cada uno de los hogels sobre el plano holograma (H), la información de las imágenes perspectivas  $C_{k,l}$  son tomadas para asignar a cada pixel del LCD (plano S) de cada hogel la información respectiva a cada posición de la cámara. En la Fig. 33, se ilustra la transformación requerida para la generación de las imágenes hogels  $h_{i,j}$  a partir de las imágenes perspectiva recortadas  $C_{k,l}$ .

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

A partir de la implementación de este algoritmo, en la Fig. 34 se ilustra el procedimiento realizado para la generación de las imágenes hogels a partir del conjunto de imágenes  $C_{k,l}$ .

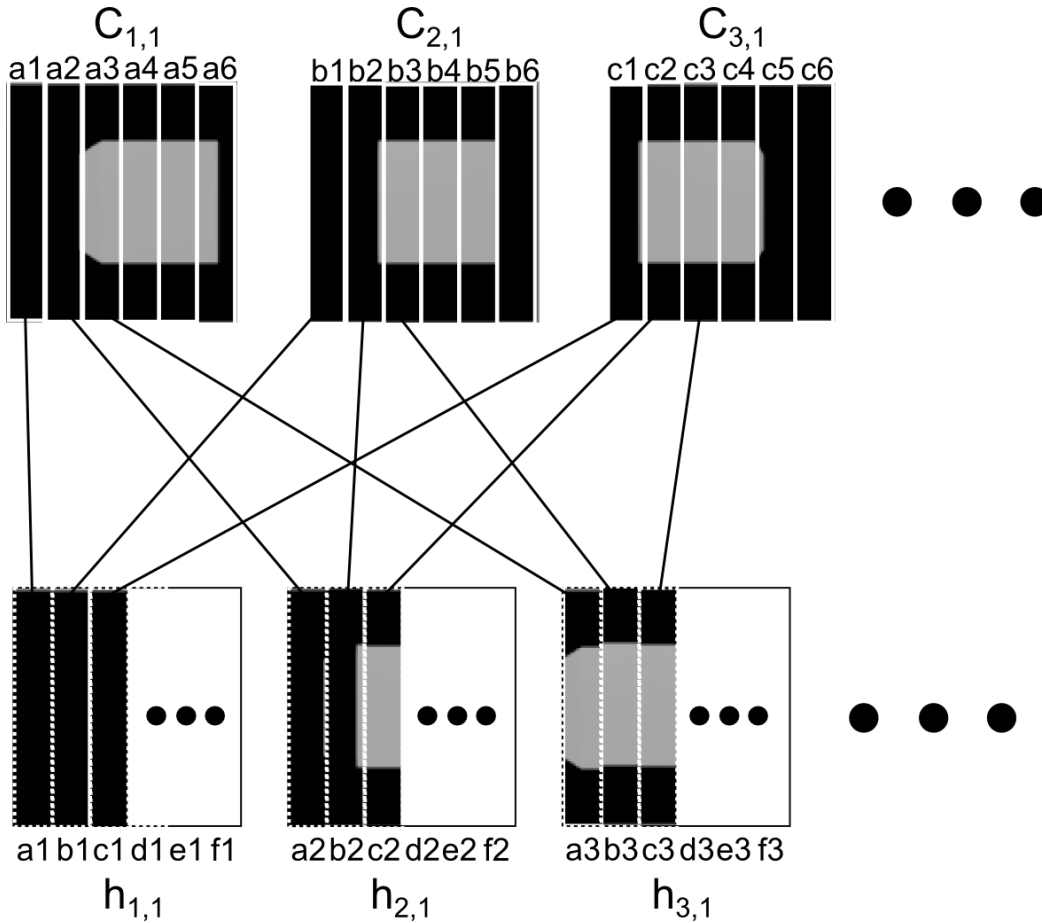


Fig. 33. Transformación aplicada sobre el conjunto de imágenes perspectiva  $C_{k,l}$  para la generación del conjunto de imágenes hogel  $h_{i,j}$  para un estereograma holográfico de solo paralaje horizontal.

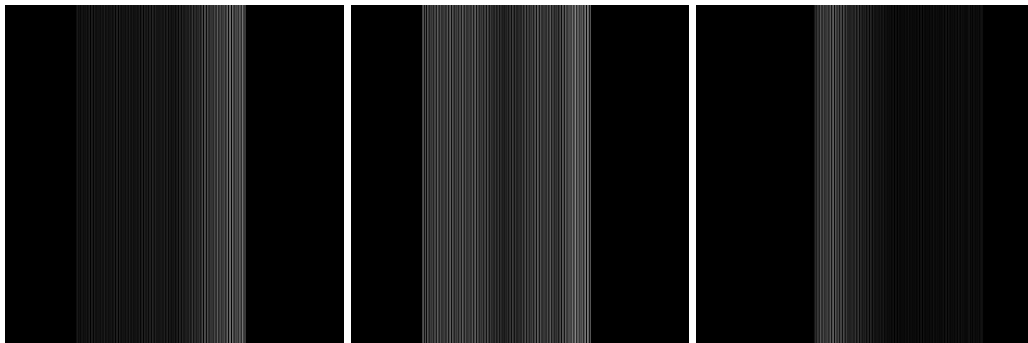


Fig. 34. Selección de tres imágenes hogels obtenidas para una escena compuesto de un cubo y realizando el procedimiento descrito en esta sección para  $K = 108$  imágenes y  $L = 1$ .

### 4.2.2 Cámara centrada

Como se describió en la sección anterior, es claro que el método de cámara simple requiere de cámaras de FOV grande que difícilmente puede ser implementado bajo cámaras fotográficas reales, esta configuración hace que las imágenes perspectivas adquiridas contengan mucha información no relevante para el registro del EH y que debe entonces ser procesadas posteriormente para eliminar esta información [15][19].

En esta sección se describe el método de cámara centrada, el cual se basa en una cámara con FOV fijo y que se desplaza a lo largo de un plano cámara (C) y es rotada por cada posición de captura para dirigir su campo visual al centro del plano imagen (I). Por su configuración, este método puede ser empleado directamente por una cámara real [43] o por cámaras virtuales empleando softwares de computación gráfica 3D [19][30][31]. Adicionalmente, la información adquirida por las cámaras contiene únicamente información de la escena contenida en el plano imagen I, correspondiendo a información contenida por el plano holograma H, de acuerdo a la ecuación 10).

Para generar las imágenes hogels  $h_{i,j}$ , el conjunto de imágenes perspectivas deben ser transformadas pixel a pixel para ajustar las imágenes hogels a las restricciones geométricas impuestas por el sistema óptico de registro y evitar así distorsiones que afecten la calidad de la imagen 3D reconstruida.

En la Fig. 35 se esquematiza la configuración geométrica del método de cámara centrada, en esta, la adquisición de las diferentes perspectivas del objeto o escena es realizada por la cámara ubicada sobre el plano cámara C a una distancia  $d_c$  del plano holograma H, el campo visual de la cámara es elegido para que en su posición central sobre el plano cámara (C) se ajuste exactamente al plano holograma H [8] de acuerdo a las ecuaciones 14) y 15).

$$\theta_H = 2 \tan^{-1} \frac{W_{holo}}{2d_c} \quad 14)$$

$$\theta_V = 2 \tan^{-1} \frac{H_{holo}}{2d_c} \quad 15)$$

De la misma forma en que el método de cámara simple produce los puntos de vista sobre el plano de visualización (V), son generados los puntos de vista sobre el plano de visualización (V) para el

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

método de cámara centrada y es sobre estos puntos de intercepción que debe ser posicionada la cámara para adquirir la información a ser registrada en cada uno de los hogels. De esta forma, la cámara ubicada sobre el plano cámara (C) percibirá diferentes rayos provenientes de cada uno de los hogels, los cuales en su conjunto componen la imagen correspondiente a la perspectiva del objeto para dicha ubicación de la cámara.

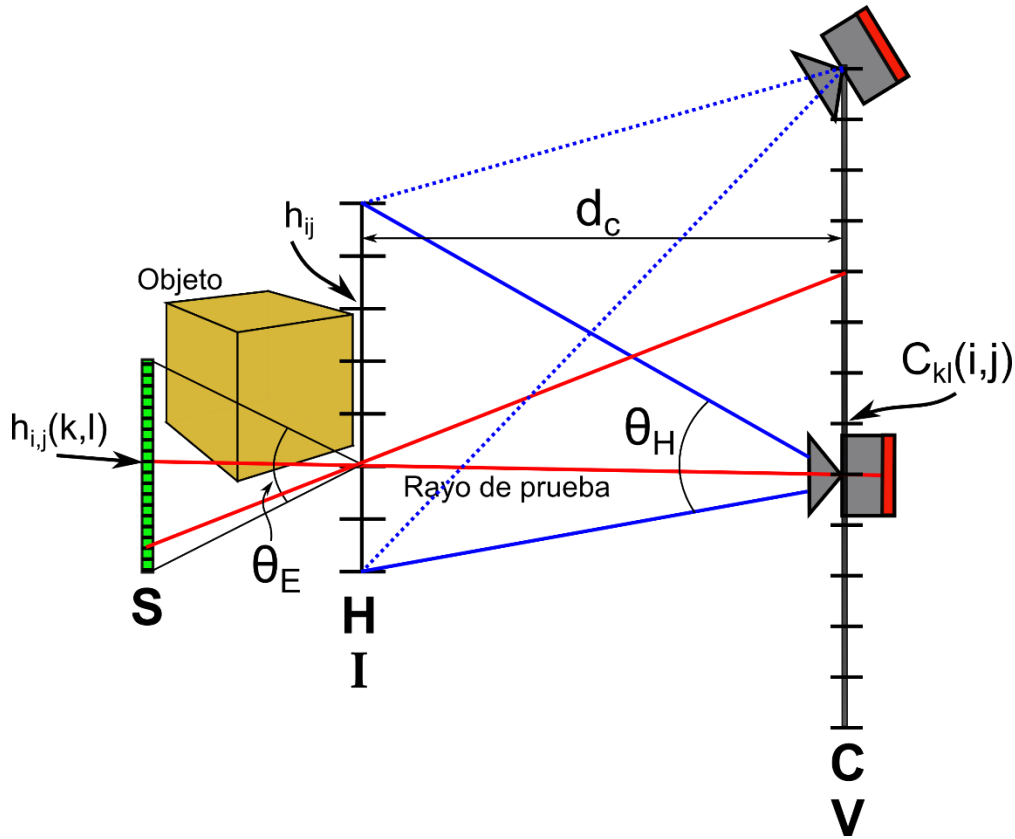


Fig. 35. Configuración geométrica del método de cámara centrada.

Ahora, siguiendo la Fig. 35, elijamos dos pixeles ubicados sobre un mismo plano **S**, es decir generados por el mismo hogel **h<sub>ij</sub>**. Observamos que la trayectoria realizada por cada uno de los rayos de estos pixeles (líneas de color rojo), corresponden a posiciones diferentes de la cámara sobre el plano cámara (**C**). De esta forma, la imagen hogel **h<sub>ij</sub>** no contiene información de una sola perspectiva de toda la escena, sino, contiene una porción de la información de cada una de las perspectivas capturadas **C<sub>kl</sub>** sobre el plano cámara **C** [8] [19].

De esta forma, el método de cámara centrada ajusta la resolución de las imágenes capturadas por la

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

---

cámara  $C_{k,l}$  a la cantidad  $N \times M$  de hogels a ser registrados, siendo  $N$  y  $M$  la cantidad de hogels horizontales y verticales respectivamente, y por otro lado, la resolución o cantidad de pixeles  $K \times L$  del LCD, siendo  $K$  y  $L$  la cantidad de pixeles horizontales y verticales respectivamente sobre el plano  $S$ , con la cantidad de imágenes que deben ser adquiridas por la cámara [19] [20].

Con lo anterior, la transformación que debe ser aplicada para obtener las imágenes hogels  $h_{i,j}$  a partir de las imágenes de perspectivas  $C_{k,l}$  capturadas por una cámara convencional, se describe a partir de la expresión simplificada ecuación 16) [19] [20].

$$h_{i,j}(k, l) = C_{k,l}(i, j) \quad 16)$$

$$k = 1, 2, \dots, K; \quad l = 1, 2, \dots, L$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, M$$

Donde  $k$  y  $l$  son índices que determinan la posición de la cámara e  $i, j$ , denotan la posición de cada pixel en el sensor de la cámara. Cada imagen capturada tiene una resolución de  $N \times M$  pixeles y la resolución de cada imagen hogel es de  $K \times L$  pixeles.

Finalmente, la transformación definida por la ecuación 16) indica una redistribución de los pixeles de cada imagen perspectiva  $C_{k,l}$  obtenida, generando así las imágenes hogels  $h_{i,j}$  que son proyectadas por un LCD. Esta transformación se ilustra en la Fig. 36 [19] [20].

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

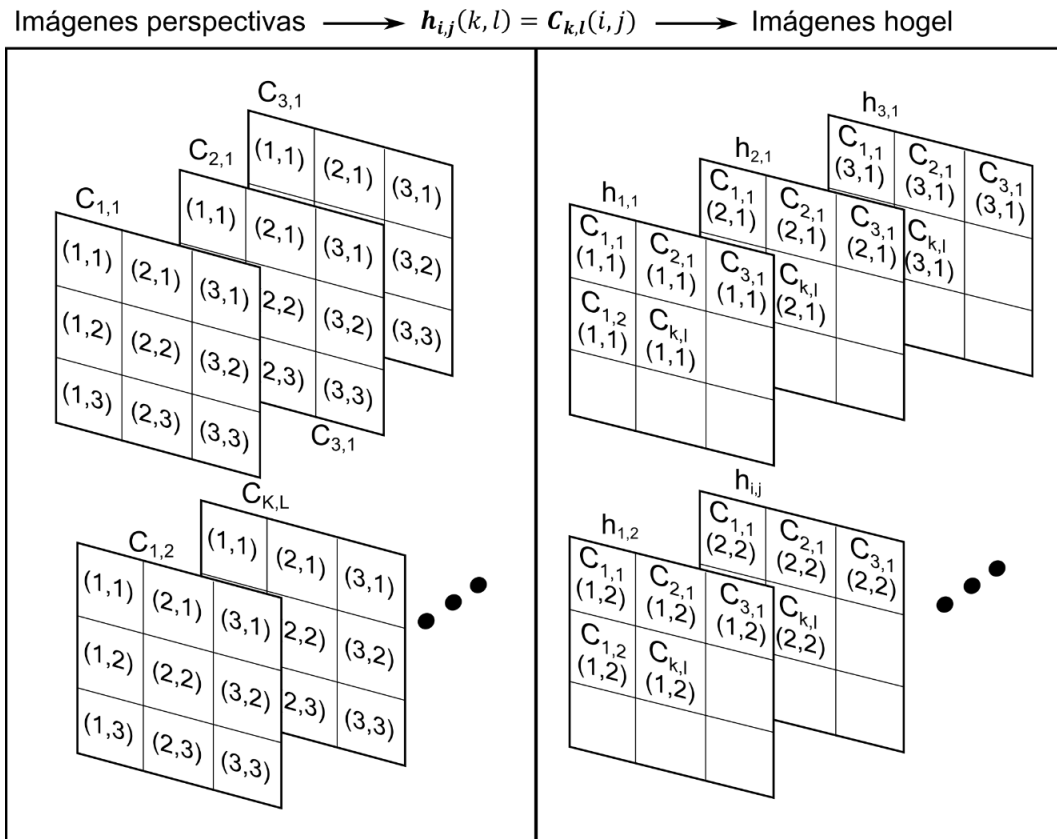


Fig. 36. Remuestreo de píxeles para la obtención de imágenes hogel a partir de imágenes perspectivas bajo la configuración de cámara centrada, en ilustración procedimiento realizado para un conjunto de 3 x 3 imágenes perspectivas cada una de resolución 3 x 3 píxeles.

En la Fig. 37, se ilustra para una escena creada en computador, una selección de las imágenes perspectivas y una selección de las imágenes hogels obtenidas a partir del método de cámara centrada.

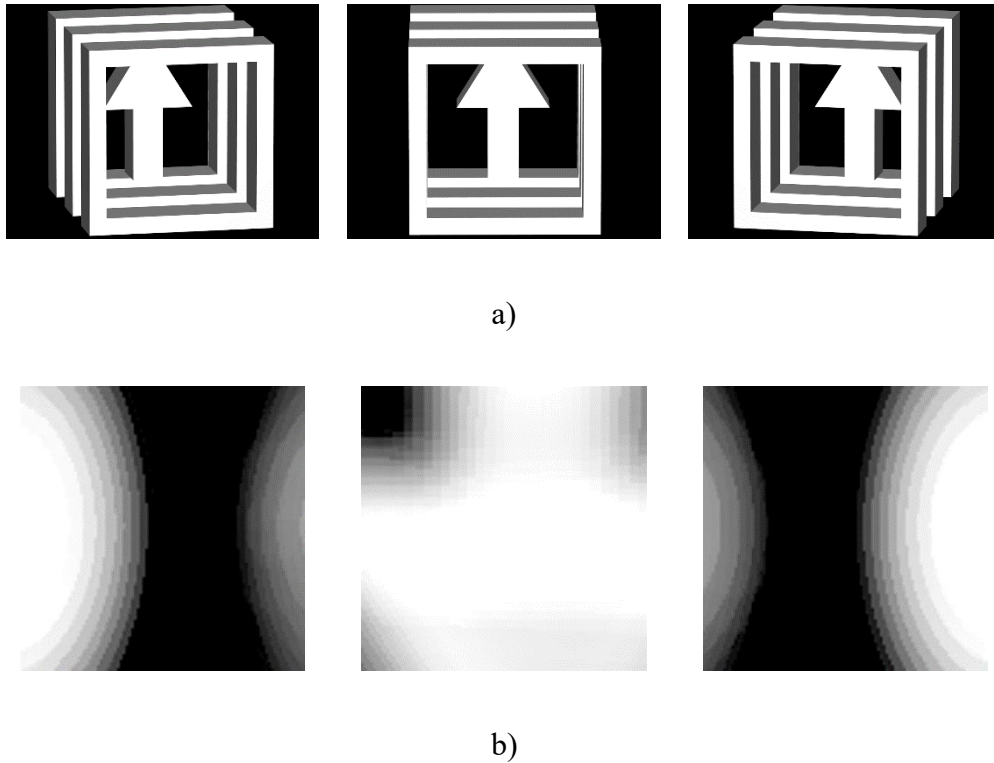


Fig. 37. Generación de imágenes hogels usando el método de cámara centrada. a) selección de imágenes perspectivas, b) selección de imágenes hogel.

### 4.2.3 Rendimiento comparativo de los métodos de punto de vista

Los métodos de adquisición basados en el método de punto de vista, son implementaciones de un alto consumo computacional debido a la cantidad de información que requieren para generar las imágenes hogels. Estos métodos generan las imágenes hogels a partir de un conjunto de imágenes perspectivas capturadas por cámaras convencionales reales o generadas por computador, de acuerdo a las configuraciones presentadas en la sección 4.2. Las transformaciones aplicadas por estos métodos son interpolaciones realizadas para ajustar los modelos a las restricciones geométricas de la configuración óptica de registro, en este sentido, generar una mejor reconstrucción tridimensional depende de la cantidad de información capturada inicialmente.

Para el caso del método de cámara simple, de acuerdo a la ecuación 12), la cantidad de imágenes es proporcional a la resolución del LCD empleado, y a la cantidad de hogels registrados. De esta forma, registrar un EH de 60 cm x 40 cm, tamaños usados comercialmente, con un tamaño de hogel de 0.5 mm, requerirá aproximadamente una cantidad de 1200 x 800 hogels [15][29]. Usando un LCD con

resolución 1280 x 768 pixeles serán requeridas aproximadamente 500 imágenes renderizadas cada una con una resolución de 2400 x 800 pixeles para el caso EH-PH. Dependiendo de la complejidad de la escena, la cantidad de polígonos a ser renderizados y la cantidad de iluminación utilizada, renderizar cada imagen puede tomar alrededor de 5 horas [29].

Un comportamiento similar presenta el método de cámara centrada, si bien este método reduce significativamente la cantidad de pixeles por imagen renderizada, este no reduce la cantidad de información que debe ser capturada. De acuerdo a la ecuación 16), para generar las imágenes hogels, usando los valores del ejercicio realizado anteriormente, son necesarias 1280 x 768 imágenes perspectivas cada una con una resolución de 1200 x 800 pixeles para el caso de un EH-PC. Aunque la resolución de cada imagen se reduce a la mitad, la cantidad de estas imágenes incrementa drásticamente por un factor aproximado de 2000. Almacenar esta cantidad de información en un disco duro es aproximadamente del orden de 2 TB de información [15]. Posteriormente esta cantidad de imágenes deben ser transformada una a una para generar las imágenes hogels, incrementando significativamente el tiempo de cómputo y reduciendo la eficiencia del proceso de impresión.

Los métodos de punto de vista presentan grandes retos de optimización que deben ser desarrollados para un sistema rápido y eficiente en el manejo de la información y para el registro de EH de gran formato. Estos retos involucran optimizaciones en los tiempos de cómputo para generar las imágenes hogels, manejo eficiente de memorias de almacenamiento, resolución de las imágenes y además de los algoritmos de interpolación. Una mejor experiencia visual 3D se genera en la medida que se apliquen mejores algoritmos de interpolación que más se aproximen a las restricciones geométricas de estos sistemas.

### 4.3 Métodos de apertura

En la sección 4.2, se analizaron dos métodos para la generación de las imágenes hogels a partir del conjunto de imágenes perspectivas vistas desde la posición de un plano de visualización. Estos métodos requieren de una gran cantidad de información de entrada  $C_{k,l}$  que debe ser posteriormente procesada para obtener las imágenes hogels  $h_{i,j}$ .

Por otro lado, existen otras aproximaciones para la obtención de las imágenes hogels las cuales se ajustan de una manera directa a las condiciones geométricas de un sistema de escritura directa de hologramas, logrando así el mejor manejo de los recursos computacionales y además la mejor experiencia visual.

Diferente de los métodos de punto de vista, estos métodos solo pueden ser desarrollados usando cámaras virtuales a partir de softwares de computación gráfica, sin embargo, bajo los últimos desarrollos de la computación gráfica y de la visión por computador, el tipo de escenas al que están dirigidos estos métodos no se limitan únicamente a objetos creados por computador [44].

#### 4.3.1 Cámara truncada

Como primer método, se describe el método de cámara truncada, el cual es el más sencillo de todos los métodos para la generación de imágenes hogel [15][54]. Este método se basa en posicionar una cámara sobre cada una de las aperturas del holograma H y es dirigida perpendicularmente a este plano. De esta forma en cada uno de los hogels, los cuales delimitan la cantidad de rayos de luz que son emitidos por un EH, es capturada la información de una escena 3D.

Debido a esta configuración ninguna cámara fotográfica real convencional puede ser utilizada para obtener la información del hogel, pues requeriría ser posicionada a distancias muy cortas del objeto real en las que las cámaras no tienen capacidad de formar una imagen sobre el sensor, es por esto que son empleados softwares de computación gráfica para el uso de cámaras virtuales.

Computacionalmente una cámara truncada se obtiene a partir de un cono rectangular determinado por un plano cercano y un plano lejano que delimita la geometría de una escena para que esta pueda ser proyectada sobre un plano 2D. El modelo computacional de una cámara truncada, como se ilustra en la Fig. 38 a), posee unos planos de corte sobre los cuales una escena 3D es proyectada sobre un plano, de esta forma, para un objeto 3D que se encuentre por fuera del cono rectangular (plano de color gris) no será dibujada sobre el plano de proyección de la cámara, tal como se ilustra en la Fig. 38 b). El plano sobre el cual se realizan las proyecciones de los puntos de una geometría en una cámara virtual es por lo general el plano de corte cercano.

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

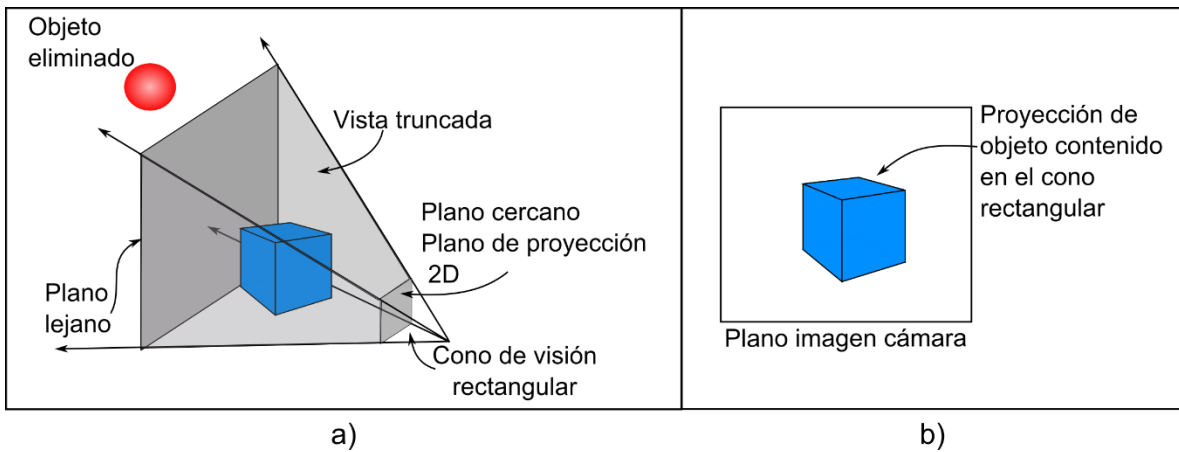


Fig. 38. a) Modelo de una cámara truncada generada en computador, b) objeto proyectado sobre el plano cercano de la cámara truncada.

Para el caso del método de cámara truncada, ver configuración en la Fig. 39 es implementada una sola cámara truncada. En este caso, a diferencia de los métodos anteriores, sección 4.2, el plano cámara C se hace coincidir con el plano de los hologramas de modo que las posiciones de la cámara correspondan con lo que será la posición de los hogels en el holograma. Una cámara virtual es posicionada en cada uno de los hogels y su campo visual es ajustado al campo visual del objetivo óptico de escritura.

Si consideramos ahora de manera simultánea la reconstrucción del EH y la configuración de adquisición del método de cámara truncada como se muestra en la Fig. 39, cada uno de los rayos generados por cada plano S (plano del LCD) de cada hogel, es capturado por la cámara y almacenada en cada uno de los pixeles conformando así una imagen 2D con la información contenida en cada uno de estos. De esta forma, la cámara es ajustada para que su resolución en pixeles coincida con la resolución del SLM utilizado. Las restricciones impuestas a la cámara virtual generada se resumen en las ecuaciones 17).

$$\begin{aligned}
 \theta_{cam H} &= \theta_{esc H} \\
 \theta_{cam V} &= \theta_{esc V} \\
 K_{cam} &= K_{LCD} \\
 L_{cam} &= L_{LCD}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

$\theta_{esc H}$ ,  $\theta_{esc V}$  son respectivamente el FOV horizontal y vertical del sistema óptico de escritura,  $\theta_{cam H}$ ,  $\theta_{cam V}$  el FOV de la cámara virtual.  $K_{LCD}$ ,  $L_{LCD}$  la resolución horizontal y vertical respectivamente del LCD y  $K_{cam}$ ,  $L_{cam}$  la resolución horizontal y vertical de las imágenes capturadas por la cámara.

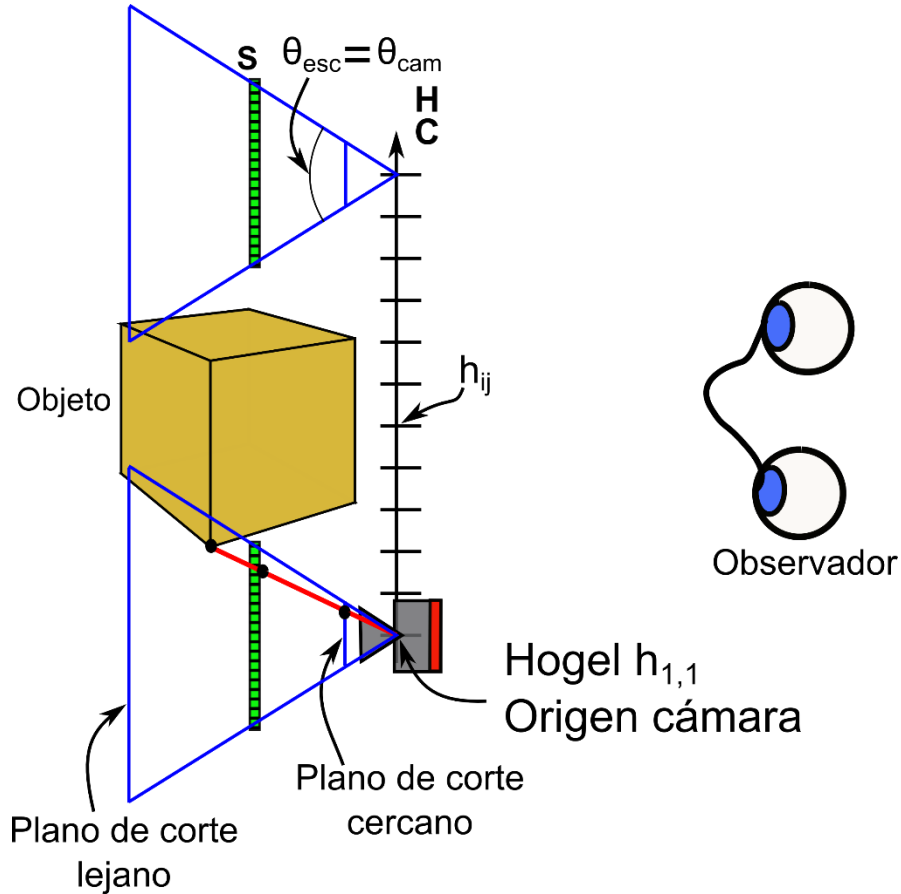


Fig. 39. Configuración geométrica del método de cámara truncada.

Para el caso de la configuración del método de cámara truncada, ilustrado en la Fig. 39, se utiliza un rayo de prueba (línea de color rojo) para evaluar la correspondencia entre un punto de la geometría de la escena 3D, un pixel sobre el plano S y un punto proyectado sobre el plano de corte cercano de la cámara truncada. Se puede ver, que existe una correspondencia directa entre la información presentada en el plano S de un hogel  $h_{i,j}$  y la información de la escena capturada por la cámara truncada, cuando esta es posicionada sobre cada hogel  $h_{i,j}$  del plano del holograma H. De esta forma, la relación entre las imágenes capturadas por la cámara truncada y las imágenes hogels están dadas

por la ecuación 18).

$$\mathbf{h}_{i,j}(k, l) = \mathbf{C}_{i,j}(k, l) \quad 18)$$

La ecuación 18) quiere decir que existe una correspondencia directa entre la imagen capturada por la cámara truncada bajo esta configuración y la información que debe ser presentada por el LCD de una escena 3D, de esta forma no se requiere de procesos intermedios de procesamiento de imágenes o remuestreos para la generación de las imágenes hogel.

Debido a las características de una cámara truncada, en la cual, la información que es adquirida está limitada por los planos de corte cercano y lejano, este método de adquisición de imágenes hogels solo permite adquirir información de las escenas 3D que se encuentran por detrás del plano del holograma y por lo tanto, solo generan imágenes 3D por detrás del plano del holograma, es decir imágenes virtuales ortoscópicas.

### **4.3.2 Doble cámara truncada (holocámara)**

El método de cámara truncada, como método computacional es uno de los más eficientes y que mejor satisface los requerimientos del sistema óptico de registro hasta ahora, sin embargo, posee una limitación y esta se basa en que se encuentra restringido únicamente para ciertas aplicaciones en que solo imágenes 3D virtuales puedan ser creadas. Es por esto, que debe implementarse un método que posea las ventajas del método de cámara truncada, pero que además pueda dar solución a su limitación.

Un método de adquisición basado en las aperturas del EH debe generar una imagen hogel con información de una escena 3D que se encuentra dividida por el plano holograma, tal como los hologramas plano imagen descritos en la Fig. 23. En este sentido, si únicamente es implementado el método de cámara truncada, este solo adquirirá información de la escena 3D de un lado de este plano. Adicionalmente, si una segunda cámara truncada del mismo tipo es utilizada y dirigida hacia el lado contrario de la primera cámara, esta no capturará ninguna información sobre la escena 3D que se encuentra entre el observador y el plano del holograma, siendo esta la información requerida para ser exhibida ante un observador.

Para solucionar esto, se debe entender como configurar una doble cámara truncada a partir de una cámara convencional y una cámara truncada pseudoscópica.

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

---

Una cámara virtual generada convencionalmente por los softwares de computación gráfica posee las propiedades descritas en la Tabla 5 [55][56].

Tabla 5. Propiedades de una cámara virtual truncada convencional.

- Esta es definida por un conjunto de vectores que determinan su posición de origen  $\mathbf{P}$ , un vector que define la dirección en que apunta la cámara  $\mathbf{V}_{view}$  y un vector que define la orientación de la cámara  $\mathbf{V}_{up}$ , como se ilustra en Fig. 40 a).
- Para dos objetos de igual tamaño, uno ubicado a una distancia mayor que el otro con respecto al punto de origen de la cámara, Fig. 40 b), la proyección del objeto más cerca del punto origen de la cámara será de mayor tamaño que la proyección del objeto más distante de la cámara.
- Para un conjunto de objetos de una escena 3D, los objetos más cercanos al punto origen de la cámara ocluyen aquellos objetos más distantes, Fig. 40 c).
- Una fuente de luz puntual aplicada sobre la escena 3D, puede ser modelado a partir del modelo de iluminación Phong [55][56], en el que las reflexiones difusa y especular son definidas respectivamente por: el producto escalar entre el vector normal  $\mathbf{N}$  de la superficie de un objeto y un vector que apunta hacia la fuente de iluminación  $\mathbf{L}$ ; el vector que apunta desde el punto del objeto hacia la cámara  $\mathbf{E}$  y el vector de reflexión  $\mathbf{R}$  el cual determina la dirección de la reflexión de un rayo de luz de la fuente puntual sobre la superficie, tal como se ilustra en Fig. 40 d).

De otro lado, para generar una imagen con una cámara truncada posicionada sobre las aperturas y que posea información de parte de la escena que se encuentra entre el observador y el plano del holograma y además, describa la escena percibida desde la posición del observador, debe desarrollarse una cámara con las propiedades descritas en la Tabla 6 [55][54][53].

#### 4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

Tabla 6. Propiedades de una cámara truncada conjugada o pseudoscópica.

- De la misma forma que el ítem de la Tabla 5, la cámara es definida por tres vectores que definen su posición de origen, un vector que define la dirección en la que apunta la cámara y un vector que define la orientación de la cámara.
- Para dos objetos de igual tamaño, uno ubicado a una distancia mayor que el otro con respecto al punto de origen de la cámara. La proyección del objeto más cerca del punto origen de la cámara será de menor tamaño que la proyección del objeto más distante de la cámara, tal como se muestra en Fig. 41 a).
- Para un conjunto de objetos de una escena 3D, los objetos más lejanos al punto origen de la cámara ocluyen aquellos objetos más cercanos, Fig. 41 b).
- Los objetos que son convexos para un observador, son cóncavos desde la vista de la cámara, y viceversa, Fig. 41 c). Hay una inversión en la profundidad.
- Para una fuente de luz puntual aplicada sobre la escena 3D, los vectores  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{R}$  y  $\mathbf{V}$  estarán definidos ahora por sus vectores conjugados  $\mathbf{N}^*$ ,  $\mathbf{L}^*$ ,  $\mathbf{R}^*$  y  $\mathbf{V}^*$ , tal como se ilustra en Fig. 41 d).

En efecto, una cámara bajo las propiedades mencionadas en los ítems de la Tabla 6 es una imagen de vista pseudoscópica y exhibe las mismas propiedades de una imagen pseudoscópica óptica generadas comúnmente en la holografía. En este sentido, una cámara truncada convencional como la utilizada en el método de cámara truncada produce una imagen de vista conocida como imagen ortoscópica.

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

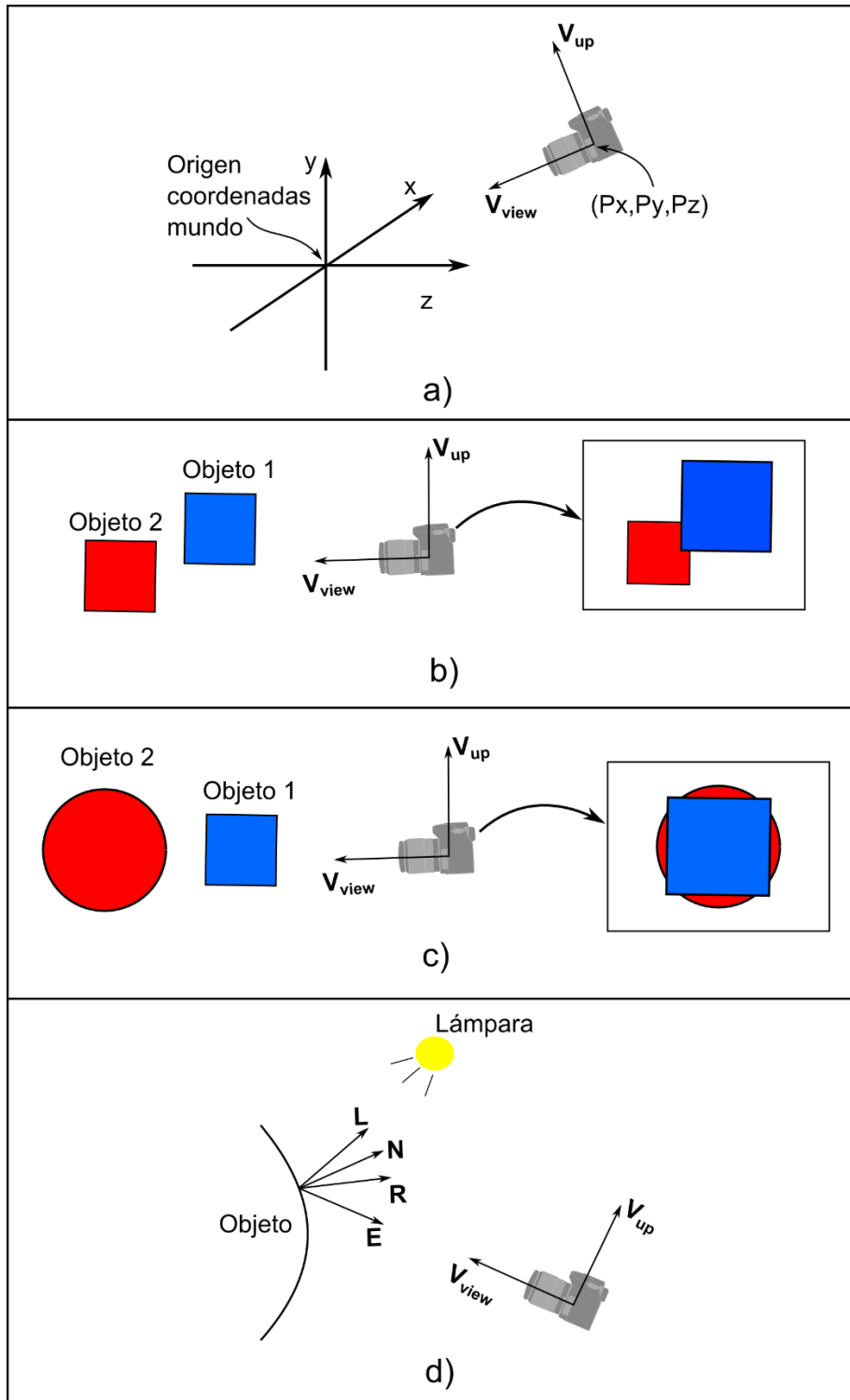


Fig. 40. Propiedades de una cámara virtual convencional generada por softwares de computación gráfica. a) vectores de una cámara virtual, b) proyección de dos objetos de una escena en el plano de la cámara, c) oclusión para una cámara convencional y c) vectores que determinan la iluminación de un objeto.

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

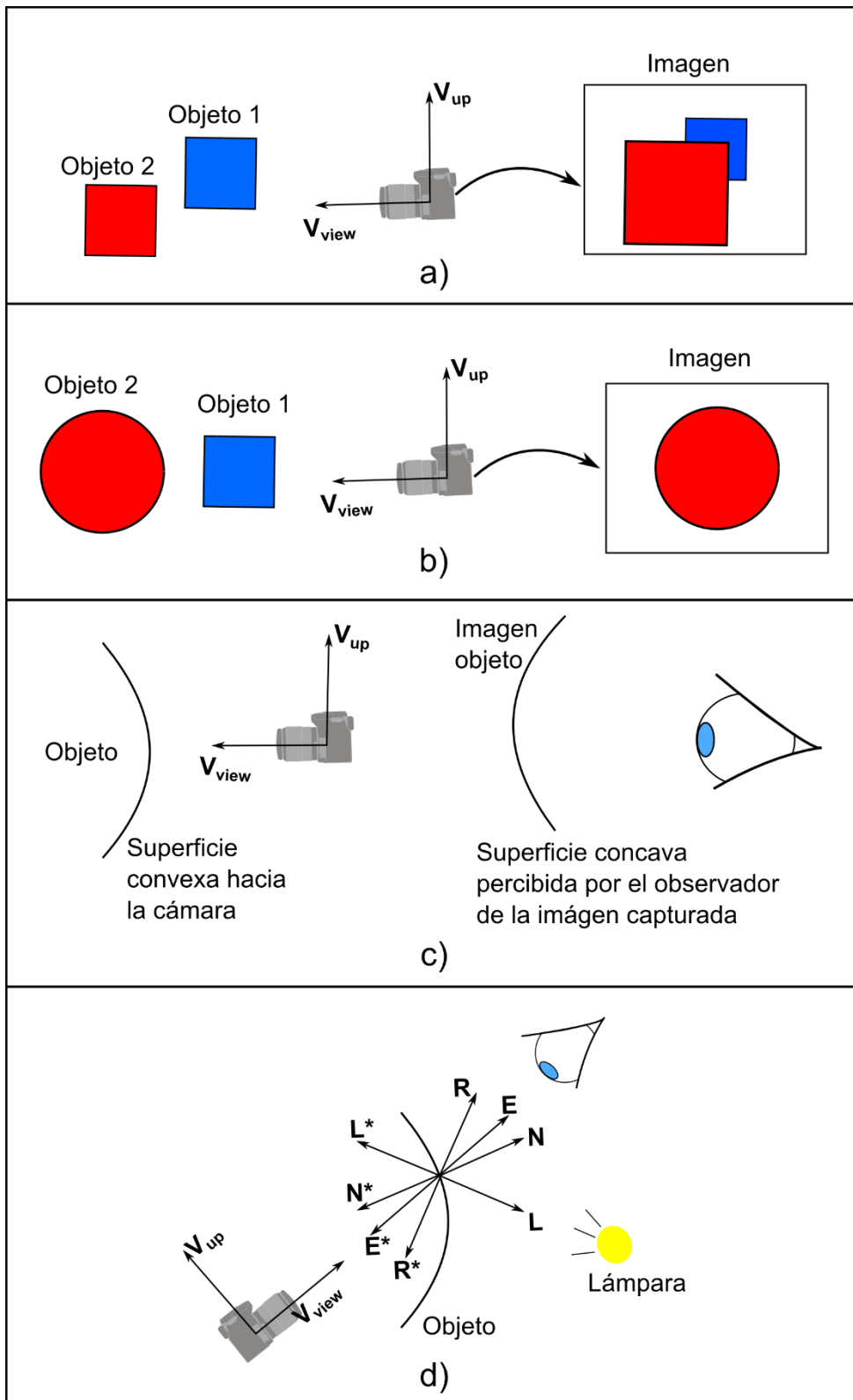


Fig. 41. Propiedades de una cámara pseudoscópica construida a partir de una cámara ortoscópica.

4. Adquisición de información tridimensional para hologramas sintéticos basados en estereogramas holográficos

De esta forma, el método de doble cámara truncada utiliza dos cámaras truncadas que son ubicadas sobre cada apertura del EH para producir las imágenes hogel y su campo visual es configurado para coincidir con el campo visual del objetivo de escritura. Una de estas es una cámara truncada ortoscópica, es decir, una cámara convencional como la descrita en el método de cámara truncada y la segunda cámara es una cámara truncada pseudoscópica con las propiedades descritas en la Tabla 6, esta configuración se ilustra en Fig. 42. Para cada una de las aperturas del EH, son capturadas las dos imágenes y posteriormente, estas son unidas para producir una imagen hogel con información de las dos partes de una escena 3D [53][54].

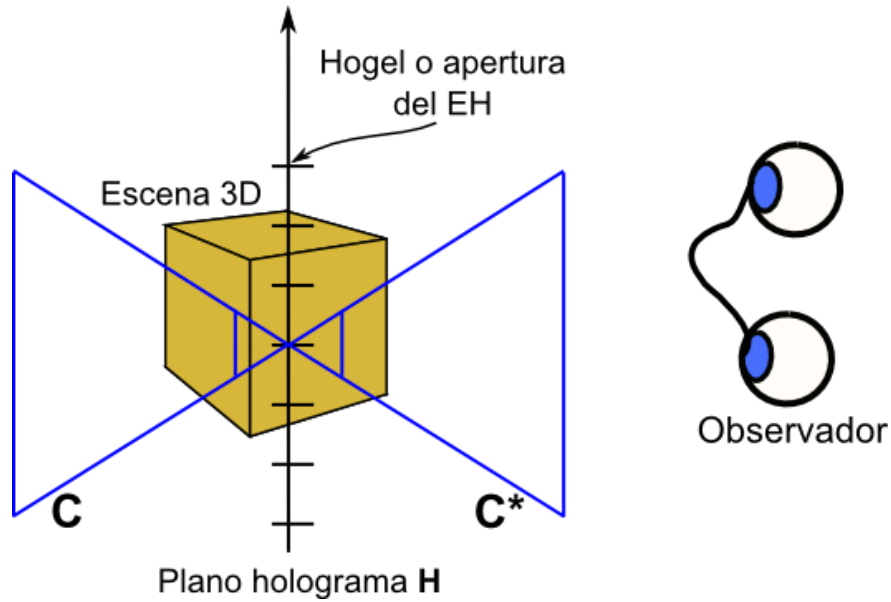


Fig. 42. Configuración del método de doble cámara truncada.

De esta forma, en este trabajo es definida la cámara ortoscópica como  $C$  y la cámara pseudoscópica, es decir la versión conjugada de la ortoscópica, como  $C^*$ , luego, para el método de doble cámara truncada podemos definir la imagen hogel a partir de la ecuación 19), donde la operación  $+$  puede realizarse a partir de diferentes métodos computacionales para la unión de dos imágenes.

$$h_{ij}(k, l) = C_{ij}(k, l) + C_{ij}^*(k, l) \quad 19)$$

## 5 Resultados Experimentales

Para la elaboración de un EH es necesario realizar tres procesos experimentales, que integrados adecuadamente, permiten generar la mejor experiencia estereoscópica y de paralaje en un observador para las condiciones implementadas, estas son: i) la generación de las imágenes hogel, ii) el registro holográfico de estas imágenes y iii) la reconstrucción del EH-PC.

Estos procesos son desarrollados de forma consecutiva para la síntesis del holograma, es decir, para poder obtener la reconstrucción del EH-PC se requiere previamente registrarlo holográficamente y previo a este, de generar las imágenes hogel. Sin embargo, desconocer el tipo de holograma que se desea en la etapa de reconstrucción y de los parámetros generados en el proceso de registro, no permitirán un adecuado muestreo de las imágenes hogel y por tal razón, no se generará una experiencia visual satisfactoria.

Para el primer proceso, de generación de las imágenes hogel, se debe realizar inicialmente la configuración y adecuación del modelo 3D, como por ejemplo su geometría, texturas, tamaño y condiciones de iluminación. Estos modelos 3D pueden ser creados en computador a partir de cualquier software CAD o softwares de computación gráfica y por otro lado, los objetos también pueden ser generados a partir de un objeto real que es digitalizado por técnicas de reconstrucción 3D.

Para este último tipo de objetos, en este trabajo se implementó un proceso en el que son capturadas diferentes perspectivas del objeto usando una cámara fotográfica, estas imágenes contienen información de las perspectivas horizontales y verticales del objeto, que posteriormente son empleadas como información de entrada por el software de reconstrucción digital Autodesk 123D

Catch para generar el modelo 3D digital<sup>3</sup> [43][5]

Existen diversos softwares gráficos 3D que pueden ser utilizados para la creación y edición de los modelos 3D y además de la configuración de cámaras virtuales para la renderización de imágenes. Algunos de los softwares de computación gráfica más usados en los estudios de entretenimiento para el desarrollo de animación o la generación de imágenes con efectos especiales son por ejemplo: Autodesk Maya®, Autodesk 3ds Max®, Blender™, entre otros [57].

Blender por ejemplo, es un software libre creado para el modelado y elaboración de animaciones gráficas 3D, que integra una serie de herramientas para la creación de este tipo de escenas, ofreciendo dentro de sus funciones aplicaciones en modelado, texturizado, iluminación, animación, post-procesado de video y creación de video-juegos [57]. Una de las ventajas que posee Blender™ es la posibilidad de desarrollar aplicaciones o herramientas más específicas a partir de su interfaz de programación de aplicaciones (del inglés API) desarrollada en Python [57], lo que permite a sus usuarios, desarrollar sus propias ventanas o herramientas para aplicaciones específicas, como es el caso de este trabajo, para poder obtener imágenes hogels a partir de las herramientas de softwares convencionales.

Blender fue usado en este trabajo para crear los modelos generados en computador, editar los modelos digitales de objetos reales y por otro lado, para configurar los parámetros de las cámaras virtuales que permitieron evaluar los métodos de punto de vista, sección 4.2 y también el método de cámara truncada, sección 4.3.1.

Por otro lado, para la implementación y evaluación del método de doble cámara truncada, sección 4.3.2, fue desarrollado un algoritmo utilizando la librería OpenGL para la creación y configuración de la cámara ortoscópica y pseudoscópica que permiten generar las imágenes hogel plano imagen.

Como ya se ha mencionado, para el proceso de registro de las imágenes hogel, fue configurado e implementado el sistema óptico descrito y analizado en la sección 3.2.1. La síntesis de los diferentes hologramas realizados en este trabajo, permitieron evaluar su desempeño como sistema óptico de registro y además del sistema mecánico y de control usando la aplicación Estereoprinter 3.0, descrita en la sección 3.1.3.

---

<sup>3</sup> Autodesk 123D Catch fue el software implementado en el momento del desarrollo de este trabajo, sin embargo su licencia y uso ha sido descontinuada: En reemplazo la firma Autodesk ha desarrollado una nueva plataforma llamada Recap Photo que posee incluso mejor rendimiento y calidad en los modelos generados [58].

Para los resultados en este capítulo se registraron, por cada uno de los métodos de adquisición de las imágenes 2D, EHs de paralaje completo y de paralaje solo horizontal. Este último para el caso del método de cámara centrada. Cada uno de los EH están compuestos por un total de 10.000 hogels y el sistema óptico fue configurado para generar un tamaño de hogel de 1mm x 1mm, lo cual conlleva a que el tamaño de los hologramas obtenidos sean de 10 cm x 10 cm.

Finalmente, una vez registrados los EH estos fueron reconstruidos con una fuente de luz blanca puntual, con la que fue posible evaluar la información del objeto, percepción de profundidad, cambios de perspectivas, el tipo de imagen 3D reconstruida, FOV de reconstrucción, eficiencia de difracción y, tamaño y distribución del hogel.

Este capítulo evalúa experimentalmente los desarrollos y modelos descritos en los capítulos anteriores. Su evaluación permitió hacer un diagnóstico y selección del mejor proceso para la elaboración de EH-PC y además, se evaluó la integración final de todas las etapas que componen el prototipo de holoinpresora construida en este trabajo.

Para esto, el capítulo es estructurado en dos partes, la primera evalúa la implementación y los resultados experimentales logrados por los métodos de punto de vista y la segunda parte es una evaluación de la implementación y los resultados experimentales logrados para los métodos de apertura.

### **5.1 Evaluación experimental métodos de punto de vista**

#### **5.1.1 Cámara simple**

El método de cámara simple, sección 4.2.1, consta en utilizar una cámara virtual configurada con FOV fijo y dirigida de forma perpendicular al plano holograma para la adquisición, inicialmente de las perspectivas de la escena 3D.

En este primer experimento, se utilizó un modelo 3D generado a partir de una persona real. Para la generación de este modelo 3D digital, fueron capturadas con una cámara fotográfica diferentes perspectivas de la persona y posteriormente procesadas en el software Autodesk 123D Catch [58].

Una vez obtenido el modelo 3D, este es llevado al software Blender en donde el modelo es editado y escalado a las dimensiones reales del holograma a ser registrado. Una imagen del modelo obtenido en Blender se muestra en la Fig. 43.

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, para la configuración del modelo 3D y de la cámara virtual es necesario partir de los parámetros de registro y del holograma sintético deseado como por ejemplo cantidad de hogels, tamaño del hogel y área del medio de registro.

Para todos los experimentos realizados se eligieron los mismos parámetros de registro, el área de registro fue elegido de 100 mm x 100 mm, con tamaño de hogel de 1mm x 1mm y el sistema de registro fue configurado para desplazarse por cada hogel un tamaño de paso de 1mm en ambas direcciones, de esta forma, fueron obtenidos EHs de 10 cm x 10 cm con una resolución de 100 x 100 hogels. En este experimento fue registrado únicamente un EH-PH (paralaje solo horizontal), por lo que solo fue necesario adquirir las diferentes perspectivas horizontales del objeto elegido.



Fig. 43. Modelo 3D utilizado para el registro del EH.

Considerando estos parámetros iniciales del EH deseado, es posible configurar las propiedades de la cámara virtual generada en Blender bajo el método de cámara simple. Para esto, partimos de utilizar las ecuaciones 12) y 13) de las que podemos obtener la relación de la ecuación 20).

$$N_{imag} = \frac{k}{m} W_{imag} \quad 20)$$

Esta ecuación, permite determinar la cantidad de imágenes perspectivas necesarias en relación a la resolución efectiva del LCD, sabiendo que este valor es conocido por las condiciones del sistema óptico implementado. El LCD utilizado posee una resolución 1920 x 1080 pixeles, sin embargo, la

resolución efectiva elegida para proyectar las imágenes hogels fue de 1080 x 1080 pixeles. Las variables  $m$  y  $k$  fueron elegidos de tal forma que la resolución de las imágenes perspectivas recortadas  $C_{k,l}$  tuvieran una resolución de 108 x 108 pixeles, es decir un submúltiplo por un factor de 10 de la resolución efectiva del LCD. La elección de estas constantes determina la calidad del EH final, pero a su vez el tiempo de procesamiento requerido para la generación de las imágenes hogels. De esta forma, fueron fijadas con los valores  $m = 10$  y  $k = 1$ . Así se obtiene que la cantidad de imágenes requeridas son:

$$N_{imag} = \frac{1}{10} 1080 = 108 \text{ imágenes} \quad (21)$$

Con el valor de la cantidad de imágenes obtenido en la ecuación 21) y utilizando la ecuación 12) se obtiene el tamaño del plano imagen  $W_{imag}$  necesario, su valor se muestra en la expresión.

$$W_{imag} = k N_{imag} = 108 \text{ pixeles} \quad (22)$$

Finalmente, para un tamaño de pixel de 1mm x 1mm y el FOV del objetivo de escritura de 60° se utiliza la ecuación 11) para calcular la distancia a la que debe ser ubicada la cámara con respecto a su plano imagen o el plano holograma, este valor está dado por la ecuación 23).

$$d_c = \frac{W_{imag} * \Delta x}{\tan(\theta/2)} = \frac{108 * 1 \text{ mm}}{\tan(30^\circ)} \cong 187 \text{ mm} \quad (23)$$

Finalmente, la cámara virtual generada en Blender es configurada con los parámetros de cámara anteriores, los cuales son resumidos en la Tabla 7, su FOV es ajustado a un ángulo de 60° y la resolución de la imagen perspectiva es configurada con un valor de  $2 * W_{imag} \times 108$  pixeles horizontal y vertical respectivamente.

Bajo estos parámetros, son capturadas un total de 108 imágenes perspectivas extendidas  $C_{k,l}^E$  cada una con resolución  $2 * W_{imag} \times 108$  pixeles, en la figura Fig. 44 a) se ilustra dos imágenes de esta secuencia.

A partir de las imágenes  $C_{k,l}^E$ , fueron obtenidas mediante un algoritmo desarrollado en Matlab, el conjunto de imágenes recortadas  $C_{k,l}$  con resolución 108 x 108 pixeles. En la Fig. 44 b) se ilustran las imágenes recortadas de las imágenes perspectivas iniciales.

Tabla 7. Parámetros de configuración de la cámara simple para la captura de las imágenes perspectiva.

Variable	Valor
Resolución horizontal imágenes extendidas (píxeles)	216
Resolución vertical imágenes extendidas (píxeles)	108
$dc$ (mm)	187
$N_{imag}$ (imágenes)	108
Paso entre capturas (mm)	1
FOV cámara (°)	60



a)



b)

Fig. 44. a) imágenes perspectivas extendidas  $C_{k,l}^E$  obtenidas bajo la configuración de cámara simple.  
 b) imágenes perspectivas recortadas.

Una vez obtenidas la secuencia de imágenes perspectivas recortadas  $C_{k,l}$ , estas fueron posteriormente procesadas, aplicando el algoritmo de remuestreo que fue ilustrado en la Fig. 33 del capítulo 4, obteniendo así las imágenes hogel que contienen información de profundidad y de paralaje del objeto 3D. En la Fig. 45 se muestra una selección de este conjunto de imágenes, la relación de posición que allí se presenta, está dada con respecto a la superficie del medio de registro. En total fueron obtenidas 10.000 imágenes hogels, cada una de resolución 108 x 108 pixeles y que posteriormente son escaladas por un factor de 10 para ajustarse a la resolución efectiva del LCD, 1080 x 1080 pixeles. El proceso de producción de las imágenes hogels se realizó en un equipo de cómputo con procesador de 64 bits, Intel core i7 4<sup>ta</sup> generación de velocidad 2.4 GHz, una memoria RAM de 8 GB y una tarjeta gráfica NVIDIA Geforce 740M. En total el procesamiento tomó un tiempo aproximado de 1 hora, sin embargo es importante tener presente que el experimento realizado, el cual buscaba validar y evaluar el método de generación de imágenes, fue diseñado bajo unos parámetros que no involucraron procesamiento de computo altamente demandantes, las imágenes extendidas obtenidas son de una muy baja resolución 216 x 216 pixeles en comparación a los requeridos para imágenes 3D de alta calidad [29], la cantidad de imágenes perspectivas fue elegida como la mínima posible y el EH fue elegido para ser de solo paralaje horizontal.

Aunque, la generación de las imágenes hogels fueron elegidas bajo estas consideraciones, no afectan la evaluación de la reconstrucción final del holograma, por el contrario, dado su alto costo computacional, es importante proponer otros métodos más eficientes.

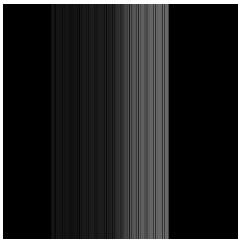
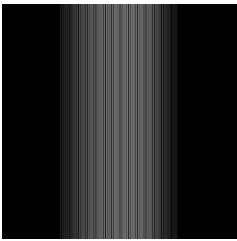
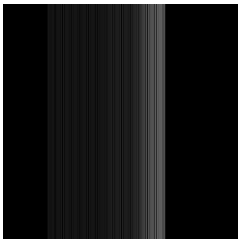
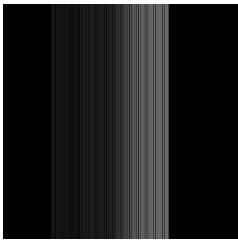
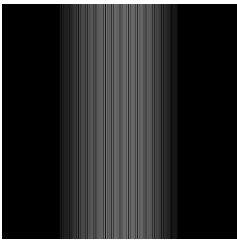
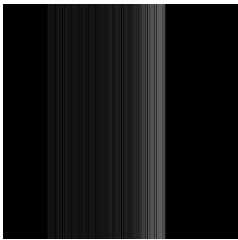
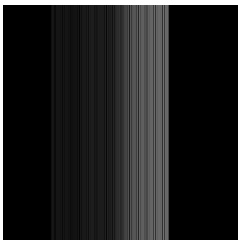
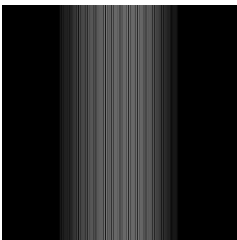
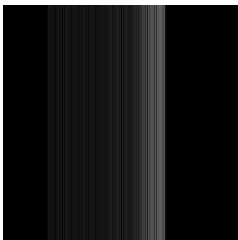
	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 45. Imágenes hogels obtenidas bajo la transformación descrita en la sección 4.2.1.

En la Tabla 8, se describen los parámetros ópticos de registro para este primer EH-PH. Estos parámetros fueron ingresados en la aplicación Estereoprinter 3.0 para el registro automático del EH, inicialmente se especifica el tamaño en hogels del EH a partir de los parámetros  $W_{holo}$  y  $H_{holo}$ , la resolución de la imagen hogel proyectada por  $W_{LCD}$  y  $H_{LCD}$ , el paso entre desplazamientos realizado por el desplazador XY por el parámetro  $\Delta x$  y finalmente los tiempos de estabilización y de exposición que fueron descritos en la sección 3.1.2. El registro de los 10.000 hogels tomó un tiempo de 12 horas.

Tabla 8. Parámetros de registro del EH-PC para el método de cámara simple.

Variable	Valor
$W_{holo}$ (hogels)	100
$H_{holo}$ (hogels)	100
$W_{LCD}$ (píxeles)	1080
$H_{LCD}$ (píxeles)	1080
$\Delta x$ (mm)	1
FOV Escritura(°)	60
T. Estabilización (s)	2
T. exposición prom. (s)	1

En la Fig. 46, se ilustran para el EH-PH reconstruido, tres fotografías para posiciones diferentes de la cámara. Para cualquier observador es fácil interpretar la información que se encuentra allí registrada, reconstruyendo este una imagen 3D real del objeto dentro de un FOV de observación de 60°, tal como se esperaba de la configuración realizada en el proceso de adquisición. El EH posee una eficiencia de difracción que permite una fácil visualización de las imágenes. Adicionalmente, con la reconstrucción holográfica se percibe de manera satisfactoria la profundidad del objeto registrado y las imágenes flotantes que son generadas por fuera de la placa de registro, sin embargo, se identifican una serie de limitaciones como por ejemplo, en la cantidad de detalles que se reconstruye del objeto en comparación a su modelo 3D original, esto debido a un sub-muestreo del modelo 3D, la baja resolución de las imágenes generadas y el proceso de interpolación realizado para la transformación de las imágenes perspectivas  $C_{k,l}$  a las imágenes hogel  $h_{i,j}$ . Mejorar la resolución de las imágenes hogel implica un incremento significativo en el tiempo de cómputo y de registro del EH.

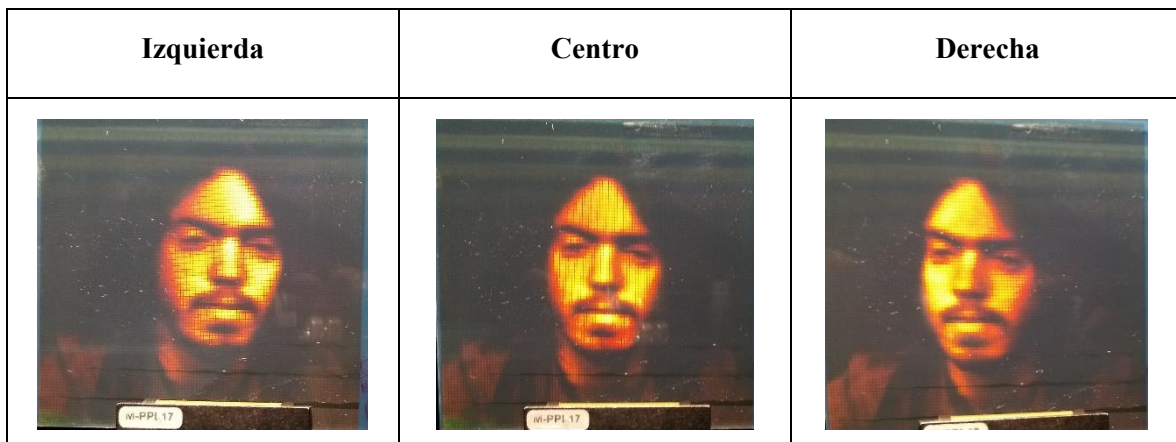


Fig. 46. Reconstrucción del EH-PH.

### 5.1.2 Cámara centrada

Para el registro y evaluación de un EH utilizando el método de cámara centrada, fue utilizado un modelo 3D generado por computador, este fue descargado de una plataforma de modelos 3D libres [59], e importado en Blender para ser ajustado a los requerimientos de registro de un EH-PC. Este es un modelo de un vehículo Mercedes Benz, de color blanco y para una mejor experiencia visual, la escena fue ajustada con diferentes tipos de iluminación para resaltar las superficies del modelo. Una imagen de este se presenta en la Fig. 47.

Al igual que el método de cámara simple, fue utilizada una cámara virtual del software Blender que fue configurada de acuerdo al modelo presentado en la sección 4.2.2. La cámara fue posicionada a una distancia  $d_c = 1\text{ m}$  del plano del holograma. Por otro lado, considerando que el holograma tiene dimensiones de  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  y utilizando las ecuaciones 14) y 15), se obtuvo que el FOV horizontal y vertical de la cámara debe ser:

$$\theta_H = 5,73^\circ, \quad \theta_V = 5,73^\circ \quad 24)$$

Bajo esta configuración, el FOV de la cámara se delimita únicamente al plano del holograma, capturando la información de la escena 3D contenida en este. Adicionalmente, para un EH-PC de  $100 \times 100$  hogels, la resolución de cada una de las imágenes perspectivas capturadas por la cámara virtual es de  $100 \times 100$  píxeles.

Cómo se analizó en la sección 4.2.2, el número de capturas es proporcional a la resolución del LCD

utilizado, que para el sistema implementado tiene una resolución efectiva de 1080 x 1080 píxeles, sin embargo, para reducir el tiempo de cómputo requerido para la renderización de las imágenes perspectivas, esta cantidad fue reducida por un factor de 5 en cada sentido, siendo necesario capturar entonces un total de 216 x 216 imágenes perspectivas, en la Fig. 48 se muestran una selección de las imágenes perspectivas capturadas bajo el método de cámara centrada. Para la cámara configurada con los parámetros resumidos en la Tabla 9, el tiempo total para la renderización de las imágenes perspectiva fue de 38 horas.

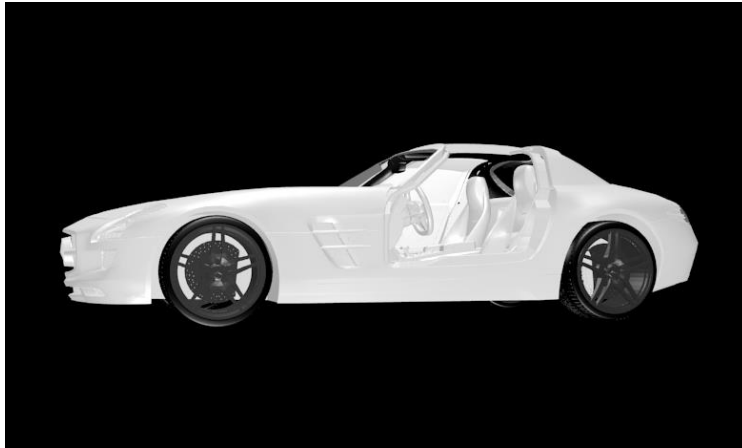


Fig. 47. Modelo 3D utilizado para el registro del EH-PC, tres fuentes de luz puntuales fueron utilizadas.



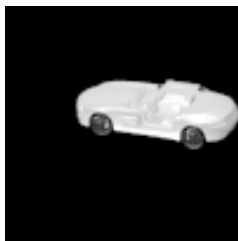
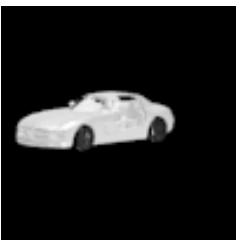
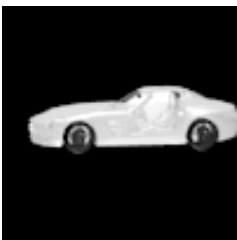
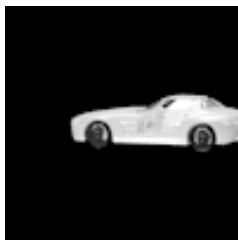

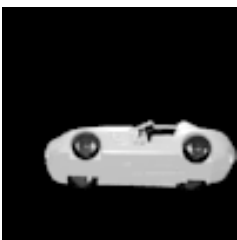

	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 48. Selección de imágenes perspectivas capturadas usando el método de cámara centrada, en total fueron capturadas 46.656 imágenes perspectivas.

Posteriormente, estas imágenes fueron utilizadas para generar las imágenes hogel a partir de un algoritmo implementado en Matlab para su remuestreo de acuerdo a la descripción de la Fig. 36 del capítulo 3, este remuestreo es definido por la ecuación 16). En la Fig. 49 se ilustra una selección de las imágenes hogel obtenidas a partir de las imágenes perspectivas utilizando el algoritmo de remuestreo. Los parámetros de adquisición de las imágenes perspectivas para el método de cámara centrada se resumen en la Tabla 9, el tiempo de cómputo para realizar la transformación de las imágenes perspectivas  $C_{k,l}$  en las imágenes hogels  $h_{i,j}$  fue de aproximadamente 5 horas.

Tabla 9. Parámetros de captura imágenes de perspectivas método de cámara centrada.

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Resolución horizontal (píxeles)	100
Resolución vertical (píxeles)	100
$dc$ (mm)	1000
$K$ (imágenes)	216
$L$ (imágenes)	216
Paso entre capturas (mm)	1
FOV cámara horizontal (°)	5,73
FOV cámara vertical (°)	5,73


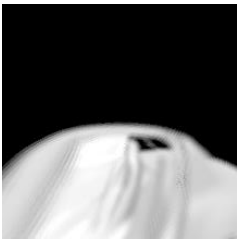
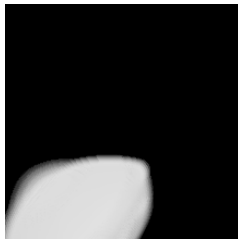
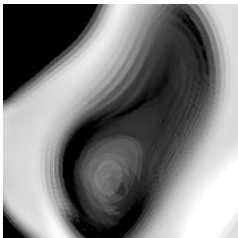
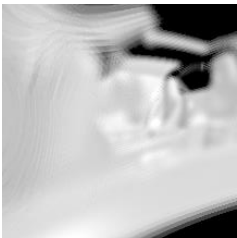
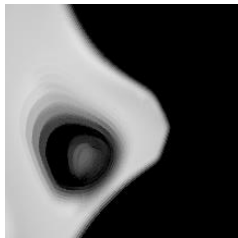
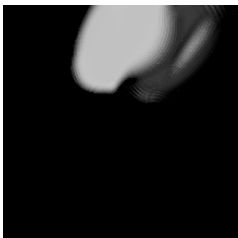
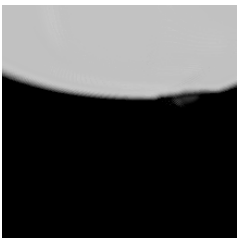
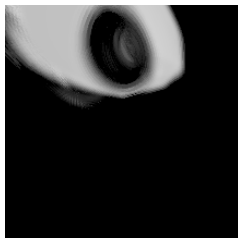
	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 49. Imágenes hogel obtenidas a partir del método de cámara centrada.

En la Tabla 10, se describen los parámetros ópticos de registro para el EH-PC. Estos parámetros fueron ingresados en la aplicación Estereoprinter 3.0 para el registro automático del EH. El registro tuvo una duración de 10 horas.

Tabla 10. Parámetros de registro de EH-PC para el método de cámara centrada

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
$W_{holo}$ (hogels)	100
$H_{holo}$ (hogels)	100
$W_{LCD}$ (pixeles)	1080
$H_{LCD}$ (pixeles)	1080
$\Delta x$ (mm)	1
FOV Escritura(°)	60
T. Estabilización (s)	1
T. exposición prom. (s)	0,4

En la Fig. 50 se muestran diferentes perspectivas del objeto reconstruido a partir del EH registrado, tomadas para diferentes posiciones de la cámara. En la reconstrucción obtenida un observador puede inferir con facilidad el tipo de objeto 3D registrado, percibiendo de este, información dentro de un campo visual de 60° tanto horizontal como vertical. Desde los diferentes puntos de vista en la zona de visualización se percibe la profundidad del objeto, generando en el observador una sensación de volumen dentro de la placa holográfica. El EH registrado es de paralaje completo, por lo que puede observarse cambios de perspectivas tanto horizontal y vertical, tal como se ilustra en las fotografías de la Fig. 50, generando así una mejor y real experiencia 3D. El resultado permite validar el método de cámara centrada como herramienta para producir hologramas sintéticos de paralaje completo con información de las escenas tanto por fuera como por dentro del plano del holograma para múltiples

posiciones del observador. Por otro lado, al igual que el resultado obtenido por el método de cámara simple, este presenta limitaciones en el muestreo de la información de las escenas 3D, exigiendo entonces gran cantidad de tiempo de cómputo para la generación de imágenes hogels de mayor resolución que aporten a una mejor experiencia visual. Y adicionalmente, dada la configuración geométrica del método de cámara centrada, las imágenes capturadas presentan distorsión de proyección en perspectiva, conocida en inglés como “keystone distortion”, lo que produce sobre la reconstrucción del holograma una distorsión de tamaño en la imagen 3D para cada posición del observador y que es apreciable significativamente. Esta transformación geométrica además de que varía el tamaño de la imagen 3D con respecto a la posición del observador, puede también introducir otros tipos de distorsiones en la forma de la geometría de los objetos reconstruidos holográficamente, afectando la calidad del EH.



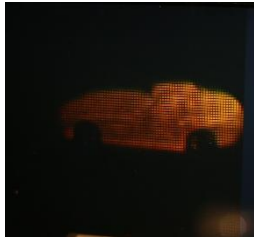





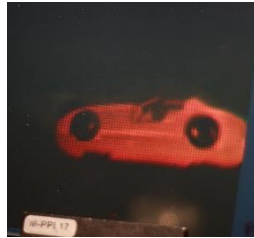
	<b>Izquierda</b>	<b>Centro</b>	<b>Derecha</b>
<b>Superior</b>			
<b>Centro</b>			
<b>Inferior</b>			

Fig. 50. Reconstrucción del EH-PH obtenido. Fotografía de diferentes perspectivas del mismo holograma sintético.

---

## 5.2 Evaluación experimental métodos de apertura

### 5.2.1 Cámara truncada

De acuerdo a lo descrito en la sección 4.3.1, el método de cámara truncada es un método en el cual el plano cámara se superpone con el plano holograma y cada uno de las posiciones de la cámara coinciden con las posiciones de los hogel, debido a esta configuración, este solo puede ser implementado bajo softwares de computación gráficas y para su implementación, al igual que en los métodos anteriores, fue utilizado el software Blender.

Por otro lado, las características de las imágenes 2D obtenidas por este método, las cuales solo pueden contener información de una escena 3D que se encuentra por detrás del material de registro, hacen que las imágenes 3D reconstruidas a partir del EH sean únicamente imágenes virtuales, por lo que utilizar este método no permite cumplir el objetivo planteado en este trabajo de producir tanto imágenes virtuales como reales y finalmente producir imágenes 3D plano-imagen.

Sin embargo, este método al ajustarse perfectamente a las condiciones geométricas de un EH, es el que mejor muestrea la información de las escenas 3D y por su configuración, es el que presenta un mejor rendimiento computacional. Implementar el método de cámara truncada, además de posibilitar el desarrollo del método de doble cámara truncada, resulta ser la mejor herramienta para ser usada en aplicaciones que requieran únicamente de imágenes 3D virtuales.

Para la evaluación de este método, fue empleado el mismo modelo 3D digital utilizado para el experimento del método de cámara simple, ilustrado en la Fig. 43. Este modelo fue llevado a Blender y con el uso de una cámara virtual fue muestreado como se describió en la sección la sección 4.3.1. El plano cámara, a diferencia de los métodos de punto de vista, fue superpuesto sobre el plano del holograma, por lo que para el EH-PC compuesto de 100 x 100 hogels cada uno separado una distancia de 1 mm, fue necesario tomar 100 x 100 imágenes, la cámara fue configurada para realizar un paso de 1 mm entre capturas.

De acuerdo a la ecuación 17) el FOV de la cámara  $\theta_{cam}$  fue ajustado para coincidir con el FOV del sistema óptico de escritura de la holoimpresora y la resolución  $K_{cam}, L_{cam}$  de cada una de las imágenes hogel con la resolución efectiva del LCD, en este sentido los parámetros de la cámara de la ecuación 17) quedan establecidos por la ecuación 25).

$$\begin{aligned}\theta_{cam H} &= \theta_{cam V} = 60^\circ \\ K_{cam} &= L_{cam} = 1080\end{aligned}\tag{25}$$

De esta forma, para los parámetros de captura resumidos en la Tabla 11, el tiempo de procesamiento para la renderización de las imágenes hogel fue de 20 minutos, en la Fig. 51 se ilustra una selección de las imágenes hogel obtenidas a partir del método de cámara truncada.

Tabla 11. Parámetros de captura imágenes hogel usando el método de cámara truncada.

Variable	Valor
$K_{cam}$ (píxeles)	1080
Resolución vertical (píxeles)	1080
Posición cámara	En plano holograma
$N$ (imágenes)	100
$M$ (imágenes)	100
Paso entre capturas (mm)	1
$\theta_{cam H}$ ( $^\circ$ )	60
$\theta_{cam V}$ ( $^\circ$ )	60

Una vez estas fueron adquiridas, posteriormente se procede con el registro del holograma sintético sin realizar ningún procesamiento de remuestreo de las imágenes como proceso intermedio, como si es requerido en los métodos de punto de vista.

Para su registro el sistema de registro fue configurado bajo los parámetros de la Tabla 12, el tamaño del holograma en hogels fue de  $W_{holo} = H_{holo} = 100$  hogels, el paso entre hogels de  $\Delta x = 1$  mm y

el tiempo promedio de exposición de 1,4 s. En total tomó 12 horas para su registro.

En la Fig. 52 se ilustran diferentes fotografías de la reconstrucción del EH obtenido. En este se puede apreciar una imagen 3D virtual de mayor realismo que los hologramas sintéticos obtenidos a partir de los métodos anteriores. Su calidad deriva en la alta resolución con la que son generadas las imágenes y su ajuste con las condiciones geométricas del EH.

Un observador que se encuentre enfrente de este EH podrá experimentar una percepción estereoscópica y de paralaje con cambios de perspectiva tanto horizontal como vertical. Adicionalmente, detalles como por ejemplo las diferentes texturas del rostro y de los hombros pueden ser apreciados fácilmente.

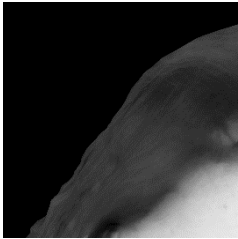
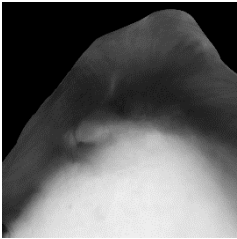
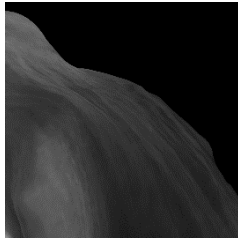
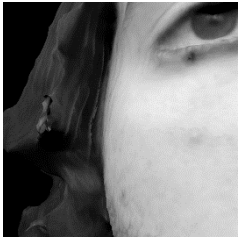
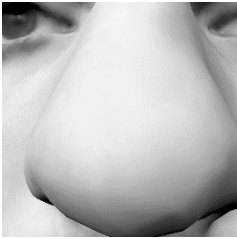
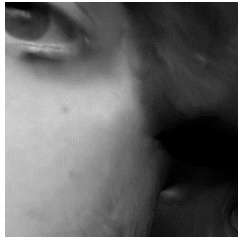
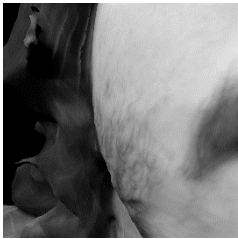
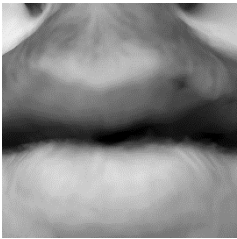
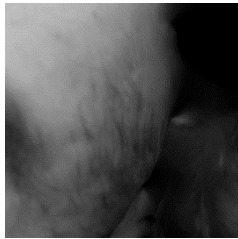
	<b>Izquierda</b>	<b>Centro</b>	<b>Derecha</b>
<b>Superior</b>			
<b>Centro</b>			
<b>Inferior</b>			

Fig. 51. Selección del conjunto de imágenes hogels obtenidas por el método de cámara truncada.

Tabla 12. Parámetros de registro EH-PC para el método de cámara truncada.

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
$W_{holo}$ (hogels)	100
$H_{holo}$ (hogels)	100
$W_{LCD}$ (píxeles)	1080
$H_{LCD}$ (píxeles)	1080
$\Delta x$ (mm)	1
FOV Escritura(°)	60
T. Estabilización (s)	1
T. exposición prom. (s)	1,4

Con el resultado obtenido, para quien ve el holograma resulta claro que el método de cámara truncada presenta las imágenes 3D de mejor calidad ya que posibilita una rápida y atractiva interpretación de la información visual presentada. Y adicionalmente, se encuentra que posibilita un manejo eficiente de los recursos computacionales implementados en la holoimpresora.





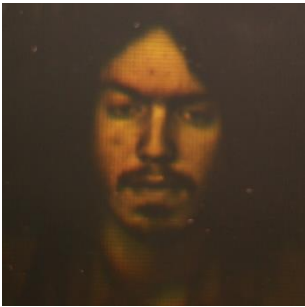




	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 52. Reconstrucción EH-PC obtenido a partir del método de cámara truncada.

### 5.2.2 Doble Cámara truncada

Para la evaluación de la implementación del método de doble cámara truncada, fueron realizados dos experimentos. El primero consistió en registrar un EH-PC con imagen 3D únicamente real. Este experimento buscó evaluar principalmente la implementación de la cámara pseudoscópica para la generación de este tipo de imágenes.

En segundo lugar, fue registrado un EH-PC plano imagen, es decir, con imagen 3D real y virtual, con lo que se pudo evaluar el método de doble cámara truncada con la integración de la cámara pseudoscópica y la cámara ortoscópica, tal como se planteó en la sección 4.3.2.

#### 5.2.2.1 Imágenes reales

Para el primer experimento, se buscó reproducir los parámetros de registro del EH-PC realizado con el método de cámara truncada, sección 4.3.1. De esta forma, se utilizó el mismo modelo digital de la persona real, ilustrado en la Fig. 43. Para la creación de la cámara pseudoscópica, fue desarrollado un algoritmo usando la librería gráfica OpenGL. Con este algoritmo es posible: a) configurar las propiedades de la cámara tal como fueron descritas en la Tabla 6 del capítulo 4, y b) cargar y configurar los modelos 3D en una escena con las condiciones de iluminación, tamaño y posición deseadas para el holograma final.

Para este método el modelo 3D fue ubicado en una posición entre la zona de visualización y el plano del holograma, el plano de la cámara fue superpuesto al plano del holograma y la cámara pseudoscópica fue dirigida hacia el lado de la zona de visualización, es decir, en sentido opuesto al utilizado en el método de cámara truncada, ver Fig. 53.

De esta forma, para un EH de 100 x 100 hogels separados por un tamaño de paso de 1mm, fueron capturadas 100 x 100 imágenes hogel usando la cámara pseudoscópica la cual fue desplazada entre captura un tamaño de paso de 1mm. La cámara fue ajustada para que su FOV fuera de 60° y su resolución igual a la resolución efectiva del LCD, es decir, 1080 x 1080 píxeles. En total, la captura de las 10.000 imágenes hogel tomó un tiempo de 15 minutos en ser generadas, en la Fig. 54 se ilustra una selección de las imágenes hogel generadas.

Para el registro, la aplicación Estereoprinter 3.0 fue configurada con los mismos parámetros de registro descritos en la Tabla 12.

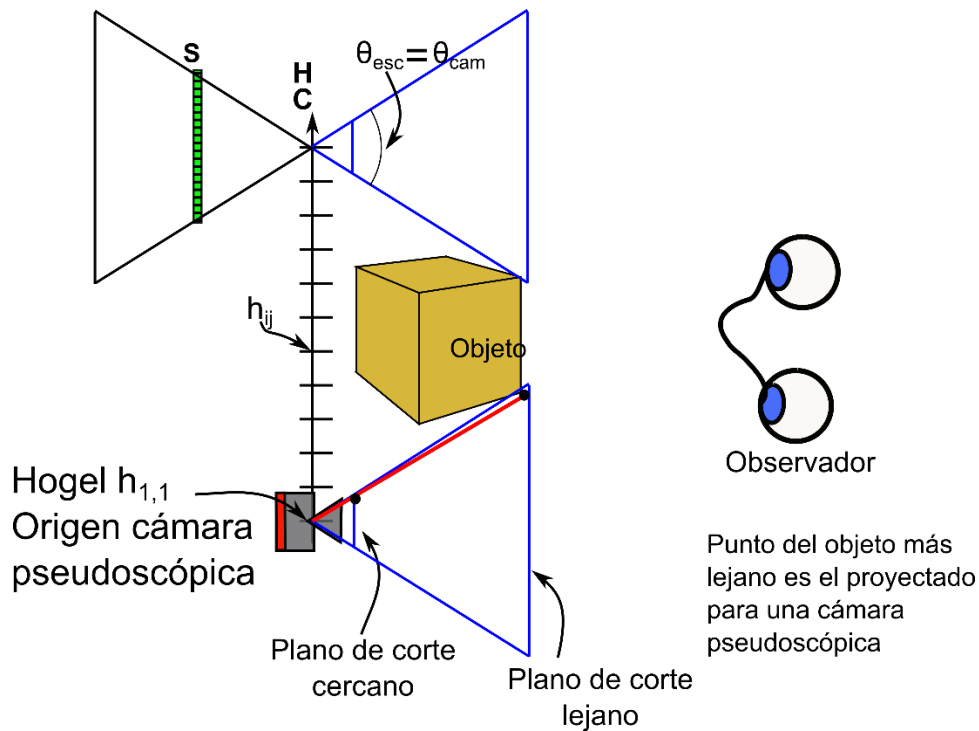


Fig. 53. Configuración de la cámara pseudoscópica en una escena 3D para generar imágenes 3D reales usando el método de doble cámara truncada.

En la Fig. 55, se ilustran un conjunto de perspectivas de la reconstrucción del EH. Este holograma sintético genera en el observador una experiencia estereoscópica y de paralaje del modelo presentado con cambios de perspectiva tanto horizontal como vertical. Adicionalmente, su éxito radica en su capacidad para generar imágenes 3D completamente reales, es decir que, cualquier observador que se posicione enfrente de este holograma ve una imagen 3D por fuera del plano del holograma que se percibe como una imagen flotante del modelo, una imagen 3D por fuera del plano del holograma hacia el lado del observador. Este resultado, fue el primero en ser obtenido utilizando el concepto del método de doble cámara truncada.

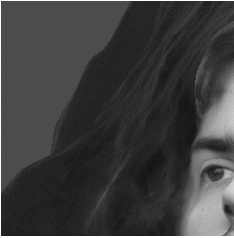





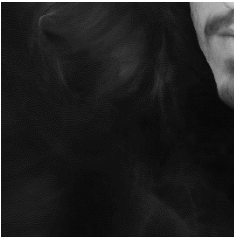
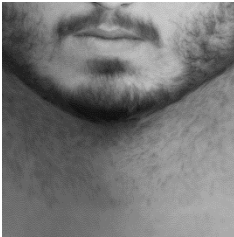
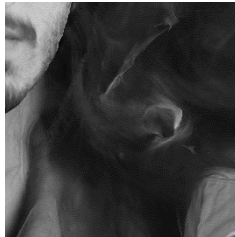
	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 54. Selección del conjunto de imágenes hogel generadas por la cámara pseudoscópica implementada.

Con este resultado la implementación computacional realizada para la generación de una cámara pseudoscópica es validada experimentalmente, su uso de los recursos computacionales en tiempo y memoria fueron probados, en total fueron capturadas 10.000 imágenes en un total de tiempo de 20 minutos. La implementación realizada muestra ser un método más eficiente con respecto a los métodos anteriores en relación al tipo de resultado esperado y también, se hace evidente la calidad de las imágenes 3D generadas a partir de las imágenes hogel obtenidas por este método.









	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 55. Reconstrucción del EH-PH obtenido a partir de las imágenes hogels generadas por una cámara pseudoscópica.

### 5.2.2.2 Plano imagen

Para el registro de un EH-PC plano imagen se utilizó el modelo 3D generado en computador que se ilustra en la Fig. 56. Para la captura de las imágenes hogels el modelo es ubicado entre el plano del holograma, configuración que se ilustra en la Fig. 42 de la sección 4.3.2, de esta forma el objeto es dividido por este plano en dos partes, una de estas se ubica hacia el lado de la zona de visualización y la otra parte ubicada en el lado opuesto. De esta forma, se espera que el holograma sintético obtenido

---

reconstruya la información 3D del objeto a partir de una imagen 3D real y una imagen 3D virtual.

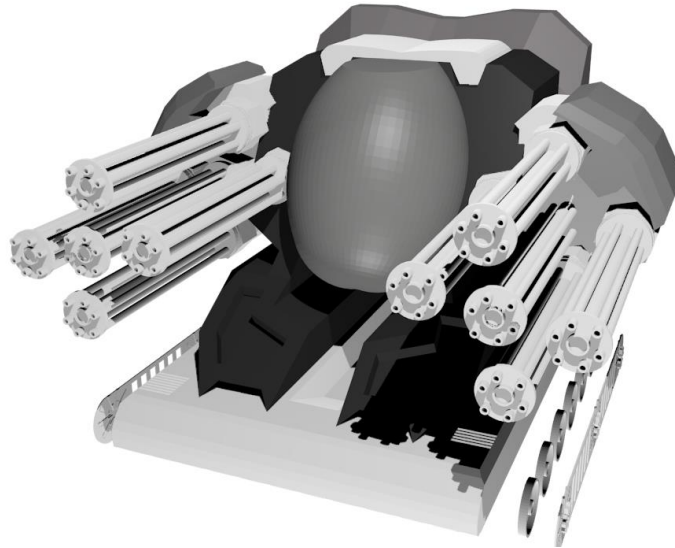


Fig. 56. Modelo 3D generado en computador para el registro del holograma sintético plano imagen.

Para la generación de las imágenes hogel, la geometría del objeto fue configurada y procesada usando la librería OpenGL, en este experimento fueron utilizadas las dos cámaras truncadas, una pseudoscópica y otra ortoscópica de la forma en que fue analizado en la sección 4.3.2. El plano cámara, que es común a los dos tipos de cámara, es superpuesto con el plano del holograma, y las posiciones de las cámaras se hace coincidir con las posiciones de los hogels. Por lo tanto, de forma sincronizada son capturadas dos imágenes por cada hogel, una imagen pseudoscópica y una imagen ortoscópica que luego son unidas utilizando algoritmos de adición de imágenes. Una vez capturadas y unidas las dos imágenes, la imagen resultante es guardada en la memoria del computador y ambas cámaras son desplazadas un tamaño de paso de 1 mm para capturar la información correspondiente al siguiente hogel. El proceso es realizado para los 10.000 hogels.

En la Fig. 57 se muestra una selección de las imágenes hogels generadas por el método de doble cámara truncada. Estas fueron generadas en un tiempo de 30 minutos.

Una vez obtenidas las imágenes, estas son posteriormente registradas por la holoimpresora sin necesidad de realizarles un procesamiento de remuestreo.

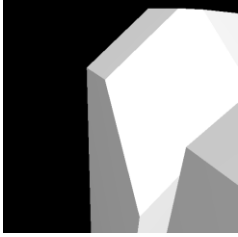
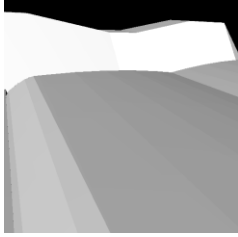
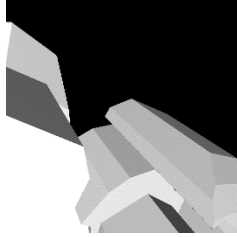
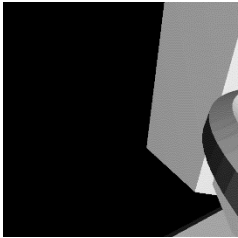
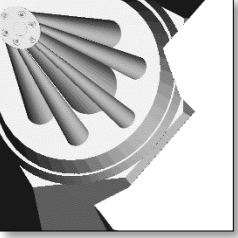
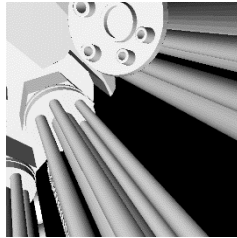
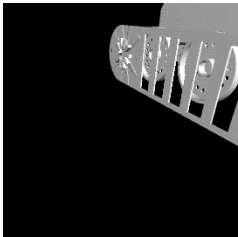
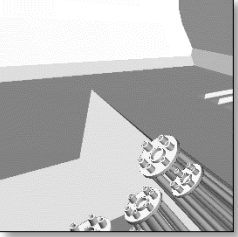
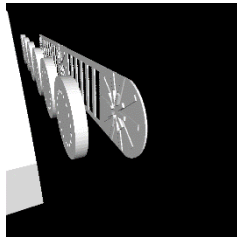
	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 57. Selección del conjunto de imágenes hogels generadas por el método de doble cámara truncada.

Cuando el EH-PC es reconstruido utilizando una fuente de luz blanca, el modelo 3D es reconstruido y es percibido por cualquier observador con una tridimensionalidad notable. En la Fig. 58 se ilustran algunas perspectivas 3D tomadas para diferentes posiciones de la cámara fotográfica.

La imagen 3D reconstruida, presenta una parte del modelo como imagen 3D real, por lo que puede ser percibida por un observador como una imagen flotante con respecto al material de registro, mientras que la otra parte del objeto es percibida por dentro del material de registro.

La imagen 3D obtenida en este experimento es una prueba exitosa de la implementación realizada del método de doble cámara truncada, su configuración no solo permite tener un uso óptimo de los recursos computacionales para una holoimpresora, sino que además, usar el método de doble cámara

truncada, como modelo geométrico que se ajusta a las condiciones de los modelos de registro y reconstrucción de un EH, presenta las mejores imágenes 3D tanto reales como virtuales que no pueden ser logradas por los métodos anteriormente estudiados y evaluados.

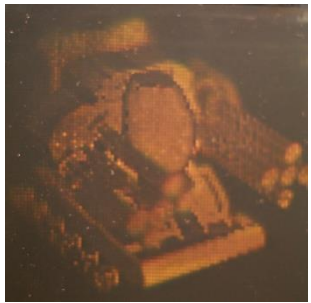



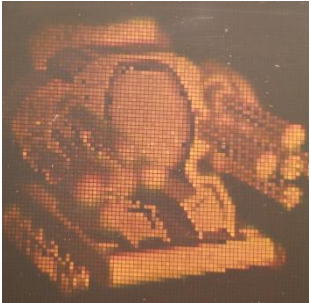
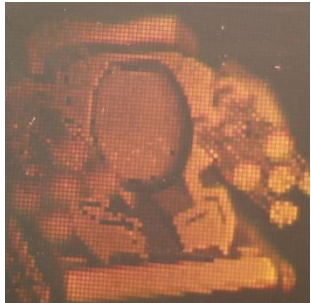



	Izquierda	Centro	Derecha
Superior			
Centro			
Inferior			

Fig. 58. Reconstrucción del EH-PC plano imagen.

## 6 Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se ha logrado implementar un sistema óptico y computacional llamado holoimpresora que permite obtener hologramas sintéticos de imágenes 3D reales, virtuales y plano imagen.

Para esto, se diseñaron y evaluaron diferentes sistemas ópticos para el registro de cada uno de los hogels que componen el EH. De los diseños ópticos fue implementado el sistema descrito en el capítulo 2, con el que se obtuvieron EH-PC con FOV de  $60^\circ$ , tamaños de hogel entre 0.3 mm y 1 mm, imágenes proyectadas de hasta 1080 x 1080 pixeles para un sistema óptico que fue optimizado para reducir la aberración esférica y la distorsión de cojín.

Por otro lado, en este trabajo fueron descritos y analizados un conjunto de modelos computacionales que pueden ser implementados para la generación de las imágenes hogels requeridas para la síntesis de los hologramas. Para su análisis, en este trabajo se propuso una clasificación que los agrupa en dos tipos: a) los métodos de punto de vista, los cuales hacen uso de cámaras que son posicionadas sobre un plano a una distancia fija del plano del holograma, y b) los métodos de apertura, los cuales a diferencia de los anteriores, posicionan las cámaras sobre el plano del holograma y por cada hogel que va a ser registrado, es capturada una imagen con las apariencias de la escena 3D que proyectaría cada uno de estos

Con los dos tipos de métodos propuesto se buscó: i) un manejo eficiente en recursos de memoria RAM para el procesamiento de las imágenes, ii) generar las imágenes hogel en el menor tiempo de procesamiento posible, iii) generar configuraciones de cámara con que mejor se ajusten a los modelos

---

de registro y reconstrucción de los EH y finalmente, iv) uno de los criterios más importantes para este trabajo, obtener imágenes 3D plano imagen a partir de imágenes hogel.

Para los métodos de punto de vista, el criterio de obtener EH con imágenes 3D plano imagen se logra bajo un costo computacional alto en relación al uso de memoria y del tiempo de cómputo, esto debido a la cantidad de información inicial requerida para la generación de las imágenes hogel. En este trabajo, estos algoritmos fueron optimizados y evaluados bajo diferentes estrategias como por ejemplo, la elaboración de algoritmos en computación en paralelo en CPU y en computación en paralelo con el uso de GPUs, sin embargo, en comparación con los métodos de apertura, estos métodos presentan una desventaja en tiempo y uso de memoria y adicionalmente, debido a los procesos de interpolación requeridos para el ajuste de los modelos, las imágenes 3D obtenidas a partir de los EH son de una calidad visual inferior a los obtenidos por los métodos de apertura.

Para el caso de los métodos de apertura, solo el método de doble cámara truncada, analizado e implementado en este trabajo, posee la capacidad de generar imágenes hogel 2D para obtener EH-PC con imágenes 3D plano imagen. Para su desarrollo fue necesario implementar un algoritmo utilizando la librería OpenGL, con lo cual fue posible construir un modelo computacional de cámara virtual que se ajuste a los requerimientos de la estereoscopia holográfica para la producción de este tipo de imágenes 3D.

Se encontró que el método de doble cámara truncada no solo optimiza significativamente los tiempos de procesamiento y el uso de memoria en comparación con los demás métodos implementados, sino también, debido a que la cámara es posicionada sobre las aperturas del display 3D, este se ajusta al modelo de un EH satisfaciendo las condiciones impuestas por los sistemas de registro y reconstrucción de este tipo de hologramas.

Finalmente, cada una de las implementaciones realizadas fueron evaluadas experimentalmente con el registro de EH-PC. Para su elaboración, fueron utilizados modelos 3D generados en computador y además, fue utilizada una persona real, quien fue digitalizada en un modelo 3D para ser sintetizado en holograma. Con los experimentos realizados, se evaluó el rendimiento de la holoimpresora a partir del registro de EH-PC de tamaño de 10 cm x 10 cm, de resolución 100 x 100 hogels, con un tamaño de 1 mm<sup>2</sup> por hogel, y adicionalmente, se evidenció el alto impacto visual que los EH pueden llegar a obtener para diversas aplicaciones bajo los recursos generados en el laboratorio.

En resumen, los resultados obtenidos en este trabajo cumplen satisfactoriamente los objetivos planteados inicialmente. Estos no solo dan prueba del entendimiento de los modelos de la

estereoscopia holográfica como display 3D, sino además, representan un avance significativo en la línea de investigación de holografía del Grupo de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT en el desarrollo de un prototipo de holoimpresora para el registro y comercialización de hologramas de diferentes formatos y objetos tanto reales como virtuales, y cuyas imágenes 3D pueden ser virtuales, reales o plano imagen.

## 7 Trabajos futuros

Como se analizó en el capítulo 2, para generar una mejor experiencia visual 3D en un observador usando un EH, se requiere mejorar las condiciones ópticas de registro que posibiliten, un FOV mayor sobre el cual el observador pueda desplazarse y percibir más perspectivas de una escena 3D, aumentar la resolución de las imágenes 2D que son registradas en cada hogel y disminuir el tamaño del hogel registrado. Todas estas condiciones ópticas se obtienen en la medida que se invierten más recursos en el diseño de un sistema óptico con aperturas numéricas más grandes que las obtenidas en este trabajo y por consiguiente, estos sistemas requieren de superficies y materiales optimizados para disminuir las aberraciones y distorsiones a las que son sujetos. Usualmente estos sistemas son diseñados para producir un FOV de  $100^\circ$  y utilizan moduladores espaciales en el que su área efectiva es del orden de  $1920 \times 1080$  píxeles. Los diseños de estos sistemas ópticos requieren de lentes que no son producidas comercialmente y por tanto sus costos aumentan notoriamente. En este sentido, se requiere de un gran esfuerzo por diseñar sistemas ópticos que satisfagan los requerimientos de las holoimpresoras y que puedan obtenerse a un bajo costo.

Por otro lado, los EHs obtenidos deben aproximarse cada vez más en la reproducción de todas las apariencias visuales de una escena 3D, una de estas y que no se encuentra dentro del alcance de este trabajo, es la reproducción del color de las escenas 3D. Es necesario para próximos trabajos, dirigir grandes esfuerzos en el diseño de una holoimpresora a color, para lo cual requerirá recurso tecnológico y recurso humano capacitado para el manejo de esta técnica. Estos sistemas son resueltos en la literatura a partir de implementar los sistemas ópticos del haz objeto y del haz referencia para

cada color RGB, transformándolos en sistemas de muy alto costo. Por otro lado, implementar una holoimpresora a color en el que solo se utilice un haz objeto y un haz referencia para los tres colores, requiere de diseños ópticos más avanzados que compensen, además de las aberraciones ópticas y distorsiones para un solo color, la aberración cromática.

Dirigir los esfuerzos en el desarrollo de una holoimpresora a color brindará a la línea de holografía, la posibilidad de unir y aplicar conocimientos y técnicas que ha ido desarrollando en el marco de proyectos realizados en holografía analógica color.

Finalmente, y como se evidencia en este trabajo, la cantidad de información que requiere la técnica de estereoscopia holográfica es alta, para lo cual es necesario optimizar los algoritmos implementados y desarrollar herramientas de computación gráfica que posibilite la generación de imágenes renderizadas mucho más realistas que la generadas actualmente en este trabajo. Adicionalmente, los desarrollos computacionales deben ser diseñados para que se puedan ajustar a las condiciones geométricas que muchos de los displays 3D requieren, no solamente para los EH, sino también en técnicas como imágenes integrales y displays de múltiples vistas los cuales requieren de implementaciones computacionales que se ajusten a sus configuraciones geométricas.

Para el caso de la línea de holografía, este trabajo propone e implementa el método de doble cámara truncada usando OpenGL y del cual se percibe la necesidad de construir una aplicación que para cualquier usuario sea posible utilizar las cámaras creadas y que además se puedan generar imágenes renderizadas de mayor realismo.

## 8 Referencias

- [1] C. Wheatstone, “Contributions to the Physiology of Vision. Part II. On Some Remarkable, and Hitherto Unobserved, Phaenomena of Binocular Vision,(Continued).,” *Proc. R. Soc. London*, vol. 6, no. 0, pp. 138–141, 1838.
- [2] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Adv. Opt. Photonics*, vol. 5, no. 4, p. 456, Dec. 2013.
- [3] M. W. Halle and S. a Benton, “Multiple Viewpoint Rendering for Three-Dimensional Displays,” Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [4] D. F. McAllister, “Stereo and 3-D Display Technologies,” 2002.
- [5] S. Zacharovas, “Advances in digital holography,” *IWHM 2008 Int. Work. Hologr.*, pp. 1–11, 2008.
- [6] M. St John, M. B. Cowen, H. S. Smallman, and H. M. Oonk, “The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks.,” *Hum. Factors*, vol. 43, no. 1, pp. 79–98, 2001.
- [7] L. Byoungcho, P. Soon-gi, H. Keehoon, and H. Jisoo, *Design and Implementation of Autostereoscopic Displays*. SPIE PRESS, 2016.
- [8] “The world’s first multi-user hologram table is here, on sale in 2018.” [Online]. Available: <http://newatlas.com/hologram-tables->

- 
- euclidean/50868/?utm\_source=Gizmag+Subscribers&utm\_campaign=5eb2975ac7-UA-2235360-4&utm\_medium=email&utm\_term=0\_65b67362bd-5eb2975ac7-92807677. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [9] “Euclidean Holographics – Powered By Unlimited Detail.” [Online]. Available: <http://www.euclideanholographics.com/>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [10] N. A. Dodgson, “Autostereoscopic 3D displays,” *Computer (Long Beach, Calif.)*, vol. 38, no. 8, pp. 31–36, 2005.
- [11] G. Saxby, *Practical Holography*, Third Edit. IOP Publishing Ltd, 2004.
- [12] S. Benton and M. Bove, *Holographic Imaging*. John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [13] P. Hariharan, *Basics of holography*. Cambridge University Press, 2002.
- [14] H. I. Bjelkhagen and D. Brotherton-Ratcliffe, “Ultra-realistic imaging: a new beginning for display holography,” *SPIE Photonics West 2014-OPTO Optoelectron. Devices Mater.*, vol. 9006, p. 900603, 2014.
- [15] H. Bjelkhagen and D. Brotherton-Ratcliffe, *Ultra-realistic imaging: Advanced techniques in analogue and digital colour holography*. CRC Press Taylor & Francis Group, Florida, USA, 2013.
- [16] H. I. Bjelkhagen, “Ultra-realistic 3-D imaging based on colour holography,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 415, no. 1, p. 12023, 2013.
- [17] R. V. Pole, “3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 20–22, Jan. 1967.
- [18] J. Svoboda, M. Skeren, and P. Fiala, “Synthetic Image Holograms,” in *Advanced Holography Metrology and Imaging*, vol. Czech Tech, 2013, p. 24.
- [19] H. Kang, E. Stoykova, J. Park, S. Hong, and Y. Kim, “Holographic Printing of White-Light Viewable Holograms and Stereograms,” in *Holography - Basic Principles and Contemporary Applications*, E. Mihaylova, Ed. InTech, 2013.
- [20] T. Honda, M. Yamaguchi, D.-K. Kang, and S. Kei, “Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV,” vol. 1051, 1989.

- 
- [21] D. Pizzanelli, “technical review The development of direct-write digital holography,” no. January, 2004.
- [22] “Geola.” [Online]. Available: <http://geola.com/>. [Accessed: 22-May-2017].
- [23] “Zebra Imaging.” [Online]. Available: <https://www.zebraimaging.com/>. [Accessed: 22-May-2017].
- [24] H. P. Dalkiran, S. Özagac, and H. Büyükbayrak, “Holographic relief map production by using topographic line maps (Digital Carto-Holograms),” *True-3D Cartogr. Autoestereoscopic Solid Vis. Geod.*, pp. 367–388, 2012.
- [25] “Holoxica Limited.” [Online]. Available: <http://www.holoxica.com/>.
- [26] L. M. Giraldo Castaño, “Registro de hologramas a partir de objetos planos generados en un lcd,” Universidad EAFIT, 2012.
- [27] A. Madrid Sánchez, “Holoimpresora: estudio y desarrollo de un sistema de escritura directa para la generación de hologramas,” Universidad EAFIT, 2015.
- [28] M. Yamaguchi, “Holographic 3-D printer,” *Oe/Lase '90*, vol. 1212, no. C, pp. 84–92, 1990.
- [29] J. Tapsell, “Direct-Write Digital Holography. Development and research of a hologram printer,” University of Sussex, 2009.
- [30] J. Park, E. Stoykova, H. Kang, S. Hong, S. Lee, and K. Jung, “Numerical reconstruction of full parallax holographic stereograms,” *3D Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–6, 2012.
- [31] J. Park, H. Kang, E. Stoykova, Y. Kim, S. Hong, Y. Choi, Y. Kim, S. Kwon, and S. Lee, “Numerical reconstruction of a full parallax holographic stereogram with radial distortion,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 17, p. 20776, 2014.
- [32] M.W. Halle, “The Generalized Holographic Stereogram,” 1991.
- [33] M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, “Holographic three-dimensional printer: new method,” *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 2, pp. 217–222, 1992.
- [34] D. Brotherton-Ratcliffe, F. Robert, A. Rodin, and M. Grichine, “Holographic Printer,” US 6930811 B2, 2005.
- [35] D. Brotherton-Ratcliffe, F. Robert, A. Rodin, and M. Grichine, “Holographic printer,” US

- 
- 7324248 B2, 2008.
- [36] C. Newswanger, M. Holzbach, and M. A. Klug, “Pulsed laser systems and methods for producing holographic stereograms,” US 6806982 B2, 2004.
- [37] A. Madrid Sánchez and D. Velásquez Prieto, “Computer graphic method for direct correspondence image acquisition used in full parallax holographic stereograms,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2016, vol. 4, no. 1, p. 99700F.
- [38] A. Madrid Sánchez and D. Velásquez, “A computational method to acquired hogel images used in full parallax holographic stereograms,” in *Latin America Optics and Photonics Conference*, 2016, p. LW3D.5.
- [39] L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. a. Jordan, “Scientific Applications: Computer synthesis of Holograms for 3-D display,” *Commun. ACM*, vol. 11, no. 10, pp. 661–674, 1968.
- [40] K. Wakunami and M. Yamaguchi, “Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane.,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 10, pp. 9086–9101, 2011.
- [41] F. Yang, Y. Murakami, and M. Yamaguchi, “Digital color management in full-color holographic three-dimensional printer.,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 19, pp. 4343–52, 2012.
- [42] K. Yamamoto, R. Oi, T. Senoh, Y. Ichihashi, and T. Kurita, “Holographic stereogram using camera array in dense arrangement,” vol. 7957, pp. 795703-795703–9, 2011.
- [43] D. Brotherton-Ratcliffe, A. Nikolskij, S. Zacharovas, J. Pilechas, and R. Bakanas, “Image capture system for a digital holographic printer,” US 2009/0147072 A1, 2009.
- [44] S. Zacharovas, A. Nikolskij, and J. Kuchin, “DYI digital holography,” *Pract. Hologr. Xxv Mater. Appl.*, vol. 7957, pp. 1–5, 2011.
- [45] Edmund Optics, “Relay Lenses - Relay Lens | Edmund Optics.” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/imaging-lenses/relay-lenses/>. [Accessed: 18-Oct-2017].
- [46] Edmund Optics, “C-mount Electrical Shutter | Edmund Optics.” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/optomechanics/irises-apertures/shutters/c-mount-electrical-shutter/#specs>. [Accessed: 18-Oct-2017].
- [47] Thorlabs, “300 mm Linear Translation Stage with Integrated Controller, Stepper Motor.”

- 
- [Online]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=7652](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7652). [Accessed: 18-Oct-2017].
- [48] Zemax, “OpticStudio - Zemax.” [Online]. Available: <http://www.zemax.com/opticstudio>. [Accessed: 20-Oct-2017].
- [49] M. A. Klug, M. Holzbach, and C. Newswanger, “Enhanced environment visualization using holographic stereograms,” 2007.
- [50] A. S. Nobuhiro Kihara Takahiro Toyoda, “Hologram printer system and holographic stereogram,” 2003.
- [51] D. J. Debitetto, “Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings.,” *Appl. Opt.*, vol. 8, no. 8, pp. 1740–1, 1969.
- [52] D. K. Kang, M. Yamaguchi, T. Honda, and N. Ohya, “Image processing technique for arbitrary image positioning in holographic stereogram,” *Opt. Commun.*, vol. 80, no. 1, pp. 7–12, 1990.
- [53] H. Mark and D. T. Chen, “Rendering Methods for full parallax autostereoscopic displays,” 6366370, 2002.
- [54] M. W. Halle and A. B. Kropp, “Fast computer graphics rendering for full parallax spatial displays,” *Proc. SPIE*, pp. 105–112, 1997.
- [55] D. Shreiner, G. Sellers, J. M. Kessenich, and B. Licea-Kane, *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3*. 2013.
- [56] M. P. B. Donald D. Hearn, “Computer Graphics with OpenGL 3rd Edition,” p. 33, 2003.
- [57] “10 Types of 3D Graphics Software Worth Knowing | Animation Career Review.” [Online]. Available: <https://www.animationcareerreview.com/articles/10-types-3d-graphics-software-worth-knowing>. [Accessed: 17-Oct-2017].
- [58] Autodesk, “ReCap | Reality Capture And 3D Scanning Software | Autodesk.” [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>. [Accessed: 17-Oct-2017].
- [59] TurboSquid, “3D Models for Professionals :: TurboSquid.” [Online]. Available: <https://www.turbosquid.com/>. [Accessed: 17-Oct-2017].