

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

CICESE © 2025, Todos los Derechos Reservados, CICESE

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



Maestría en Ciencias en Tecnologías Avanzadas e Integradas

Sistema de escaneo tridimensional mediante haces de luz estructurados

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Alexis Mayo Suárez

Ensenada, Baja California, México

2025

Tesis defendida por

Alexis Mayo Suárez

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Citlalli Teresa Sosa Sánchez

Codirectora de tesis

Dr. Ricardo Téllez Limón

Codirector de tesis

Dr. Rubén López Villegas

Dra. Rufina Hernández Martínez

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda



Dr. Benjamín Raziel Jaramillo Ávila

Coordinador del Posgrado en Tecnologías Avanzadas e Integradas

Dra. Ana Denise Re Araujo

Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Alexis Mayo Suárez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Tecnologías Avanzadas e Integradas.

Sistema de escaneo tridimensional mediante haces de luz estructurados

Resumen aprobado por:

Dra. Citlalli Teresa Sosa Sánchez

Codirectora de tesis

Dr. Ricardo Téllez Limón

Codirector de tesis

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de escaneo tridimensional basado en la estructuración de haces de luz y la técnica de triangulación láser. El sistema está constituido por un láser de Helio-Neón operando a una longitud de onda de 594.1 nm, una lente Powell para estructurar el haz de luz, un sistema formador de imágenes (cámara CMOS con sistema de lentes compuestas), un sistema mecatrónico para rotación del objeto a escanear (platina impresa en 3D con motor a pasos NEMA y control Arduino), y un sistema de procesamiento digital de imágenes para generación de nube de puntos (código desarrollado en MATLAB). Para validar la técnica de triangulación, se caracterizó la cintura del haz mediante la técnica de la navaja y se empleó una pantalla de referencia sobre una platina motorizada. Se caracterizaron tres configuraciones del sistema de triangulación, obteniendo una resolución de 238 μm . Para la estructuración del haz de luz se compararon tres elementos ópticos refractivos: una lente cilíndrica, una lente cilíndrica periódica y una lente Powell, siendo esta última la óptima para el sistema desarrollado. El sistema desarrollado demostró ser viable para aplicaciones como inspección y control de calidad, ofreciendo control directo sobre los parámetros de operación.

Palabras clave: escáner laser 3D, estructuración de luz, triangulación láser

Abstract of the thesis presented by Alexis Mayo Suárez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Integrated and Advanced Technologies..

Three dimensional scanning system through light beam structuring

Abstract approved by:

Dra. Citlalli Teresa Sosa Sánchez

Thesis Co-Director

Dr. Ricardo Téllez Limón

Thesis Co-Director

In this work, is presented the development of a three-dimensional scanning system based on the structuring of light beams and the laser triangulation technique. The system consists of a helium-neon laser operating at a wavelength of 594.1 nm, a Powell lens to structure the light beam, an image-forming system (CMOS camera with a compound lens system), a mechatronic system for rotating the object to be scanned (3D-printed stage with NEMA stepper motor and Arduino control), and a digital image processing system for point cloud generation (code developed in MATLAB). To validate the triangulation technique, the waist of the beam was characterized using the knife-edge method and a reference screen on a motorized stage. Three configurations of the triangulation system were characterized, obtaining a resolution of 238 μm . For the structuring of the light beam, three refractive optical elements were compared: a cylindrical lens, a periodic cylindrical lens, and a Powell lens, with the latter being the optimal choice for the developed system. The system for applications such as inspection and quality control, offering direct control over operating parameters.

Keywords: 3D laser scanner; beam light structuring; laser triangulation

Dedicatoria

A mi familia, por ser siempre mi mayor inspiración. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y respaldo de diversas instituciones y personas a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico y los recursos proporcionados para el desarrollo de esta investigación. Su ayuda fue fundamental para la realización de este trabajo.

Asimismo, extendiendo mi gratitud a mi asesor el Dr. Ricardo Téllez, cuyo compromiso excepcional no solo me brindó la orientación académica necesaria para llevar a cabo este trabajo, sino que también me proporcionó el respaldo y la motivación para superar los desafíos que surgieron en el camino. También agradecer a mi asesora la Dra. Citlalli Sosa cuya guía, dedicación y conocimientos fueron clave en cada etapa del desarrollo del proyecto.

A los miembros del comité de tesis los Doctores Rufina Hernández, Rubén López y Alejandro Galaviz, por sus valiosas aportaciones, comentarios y sugerencias que enriquecieron esta investigación.

Quiero expresar también mi reconocimiento y gratitud a los profesores y colaboradores de la Unidad Académica de Monterrey, quienes con su enseñanza y apoyo me proporcionaron los conocimientos necesarios para mi formación en la maestría.

Finalmente, agradezco a mi madre Niurka Suárez Vázquez, a mi padre Alexis Mayo Peralta y a mi hermana Amanda Mayo Suárez por su incondicional apoyo, paciencia y motivación a lo largo de este camino. Su respaldo fue una fuente constante de inspiración y fortaleza.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
 Capítulo 1. Introducción	
1.1. Hipótesis	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Metodología	5
 Capítulo 2. Marco teórico: escáner óptico 3D	
2.1. Técnicas ópticas de medición	8
2.2. Sistema óptico de detección de luz: sistema formador de imágenes	10
2.3. Sistema óptico de emisión de luz: haces de luz estructurados	11
2.3.1. Haces de luz estructurados	12
2.4. Sistema mecatrónico	14
2.4.1. Electromecánica: motor a pasos	16
2.4.2. Circuito de control y control digital	17
2.4.3. Diseño y manufactura asistidos por computadora	18
2.5. Procesamiento digital de imágenes: generación de nube de puntos	19
2.5.1. Algoritmo de lectura y selección de datos	19
2.5.2. Algoritmo de generación de nube de puntos	20
2.5.3. Reconstrucción digital	22
 Capítulo 3. Sistema de escaneo tridimensional mediante haces de luz estructurados	
3.1. Caracterización del sistema de telemetría óptica por triangulación	26
3.2. Sistema formador de imágenes	32
3.3. Estructuración de haces de luz	35
3.3.1. Caracterización espacial del haz láser	35
3.3.2. Caracterización de haces de luz estructurados	37
3.4. Sistema mecatrónico	41
3.4.1. Descripción del sistema	41
3.4.2. Control con Arduino/ (validación)	42
3.4.3. Diseño de carcasas (impresión 3D)	44
3.5. Generación de nube de puntos	47
3.5.1. Lectura y selección de datos	47
3.5.2. Nube de puntos	49

3.6.	Sistema de escaneo tridimensional mediante haces de luz estructurados	51
3.6.1.	Reconstrucción digital	52
 Capítulo 4. Conclusiones		
4.1.	Limitaciones y alcances del sistema	55
4.2.	Áreas de oportunidad	56
4.3.	Trabajo a futuro	58
Literatura citada		62
Anexos		68

Lista de figuras

Figura	Página
1. Diagrama de bloques de las etapas de desarrollo del sistema de escaneo óptico tridimensional.	8
2. Técnica de triangulación láser. (a) La luz reflejada por el objeto incide en un punto sobre la cámara. (b) Cuando el objeto se desplaza hacia atrás, el punto reflejado sobre la cámara se desplaza a la izquierda, y hacia la derecha cuando el objeto se desplaza hacia adelante.	10
3. Generación de líneas de luz. En a) se representa la línea de luz generada por la lente cilíndrica la cual concentra la intensidad en el centro. La lente cilíndrica periódica, mostrada en b) puede amplificar y estabilizar la distribución de luz en intervalos regulares, sin embargo tiene una profundidad de foco finita. La lente Powell mostrada en c) permite proyectar líneas de luz con una distribución de intensidad homogénea.	14
4. Ramas de la ingeniería mecatrónica.	15
5. Coordenadas cilíndricas. r : Distancia radial desde el eje central (equivalente a X y Y en coordenadas cartesianas, pero en forma polar) θ Ángulo entre el vector y el eje X en el plano XY (coordenada angular). Z : Altura o desplazamiento vertical, igual que en el sistema cartesiano.	22
6. Representación gráfica de los tres arreglos utilizados para la caracterización y validación del sistema óptico. En a) se representa la fuente de luz láser perpendicular al objeto, en b), la cámara perpendicular al objeto y en c), ambos elementos en ángulo.	27
7. Arreglo experimental para la caracterización de la técnica de triangulación óptica. Los principales elementos son: 1- láser He-Ne, 2- sistema formador de imágenes (cámara con sistema de lentes) y 3- pantalla u objeto.	28
8. Representación gráfica de la proyección del spot en la pantalla de referencia. Cada punto representa la ubicación en píxeles de dicha proyección. En a) se representa la variante con la fuente de luz láser perpendicular al objeto, en b), con la cámara perpendicular al objeto y en c), ambos elementos en ángulo.	29
9. Captura de imágenes. En (a) el ajuste del enfoque de la cámara CMOS y en (b) el cuadro de diálogo del software de la cámara CMOS para el control de parámetros de exposición.	34
10. Intensidad del haz registrada por el detector en función de la posición de la navaja.	36
11. Imágenes obtenidas con la cámara CMOS de la estructuración de los haces de luz utilizando los tres elementos ópticos. En el a) se obtuvo la línea de luz por medio de la lente cilíndrica, en b) por la lente cilíndrica periódica, y en c) por la lente Powell.	37
12. Varianza de la línea de luz generada por los elementos ópticos analizados. En (a) se representa la línea de luz obtenida por la lente cilíndrica y en contraste con la línea vertical que mejor se ajusta. De igual manera en (b) corresponde a la lente cilíndrica periódica y en (c) a la lente Powell.	40
13. Diagrama de flujo del proceso de control del motor a pasos. Tras un retraso inicial para estabilizar el sistema, el driver se habilita y el motor realiza 200 pasos en una dirección, generando pulsos en el pin correspondiente. Posteriormente, se espera un tiempo, y el motor invierte su dirección para repetir el proceso en sentido opuesto. El motor se desactiva y el programa termina.	43

14.	Diseño de la estructura de soporte del sistema mecatrónico. En (a) la plataforma giratoria donde se colocarían los objetos a escanear. En (b) la estructura de la parte superior la cual en su interior se colocó el motor a pasos. En (c) la estructura de la parte inferior la cual le soporte a todo el sistema.	45
15.	Sistema mecatrónico en su etapa de armado. (a) parte superior y plataforma con motor a pasos, (b) parte inferior con placa Arduino y driver de motor, (c) estructura ensamblada con la electrónica integrada	46
16.	Representación gráfica de nube de puntos	51
17.	Sistema de escaneo tridimensional.	52
18.	Ejemplo de la reconstrucción digital obtenida con el sistema de escaneo tridimensional desarrollado.	53
19.	Escaner comercial.	59
20.	Reconstrucción tridimensional obtenida con el sistema comercial.	60
21.	Código desarrollado para el control del motor a pasos.	68
22.	Script para reconstrucción numérica tridimensional del objeto.	69
23.	Plano de la estructura de la parte superior	70
24.	Plano de la estructura de la parte inferior	71

Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Resultados de la caracterización óptica de los 3 arreglos experimentales.	32
2.	Resultados de la varianza (nominal y en unidades enteras) e intensidad de las líneas de luz lograda con los diferentes elementos ópticos.	39
3.	Comparación de algunos parámetros entre nuestro sistema desarrollado y el sistema comercial.	61

Capítulo 1. Introducción

Determinar las dimensiones o la forma de un objeto tiene gran importancia práctica en la vida cotidiana: la capacidad de capturar y comprender la geometría tridimensional de los objetos tiene implicaciones significativas en una variedad de sectores industriales y científicos. En la fabricación de componentes y piezas, por ejemplo, conocer con precisión las dimensiones y la forma de un objeto es esencial para garantizar la calidad y funcionalidad del producto final. Tareas como estas suelen requerir mediciones precisas de la profundidad en áreas reducidas. Además, algunas tareas dependen de la medición exacta de un conjunto específico de puntos bien definidos. Por ejemplo, la medición tridimensional se puede utilizar para verificar si un proceso de ensamblaje ha sido completado con la precisión necesaria o para medir el movimiento relativo entre componentes clave durante una prueba de impacto. Estas aplicaciones demuestran la versatilidad de las técnicas de escaneo tridimensional en entornos diversos, donde la precisión y la comprensión detallada de la geometría son fundamentales para el éxito de las operaciones (Malik, 2011). En la simulación de cargas y esfuerzos mecánicos, comprender la forma y estructura de los objetos es esencial para evaluar cómo interactúan con fuerzas externas y cómo soportarán tensiones en diferentes situaciones. En el ámbito de la impresión en 3D, una reconstrucción tridimensional es la base para la creación de modelos digitales que se traduzcan en objetos tangibles con alta fidelidad (Moreno-Oliva et al., 2014; Rojas et al., 2019).

Un escáner 3D es un dispositivo que mediante la proyección de luz sobre un objeto, captura datos sobre la forma y, en algunos casos, el color de un objeto o entorno, generando una representación digital tridimensional detallada del mismo. La evolución de esta tecnología comenzó en la década de 1960 con equipos que utilizaban luces, cámaras y proyectores para recopilar datos. Posteriormente, en la década de 1980, estos sistemas fueron reemplazados por escáneres que utilizaban luz blanca, láseres y técnicas de sombreado para obtener una mayor precisión en la captura de superficies (Edl et al., 2018).

En la ingeniería moderna, el término *escaneo láser* se refiere tanto al proceso general de deflexión controlada de haces láser para diversas aplicaciones, como a la técnica específica de medir distancias con láseres para capturar la forma de objetos, edificaciones y paisajes. Los escáneres 3D operan de manera similar a las estaciones totales motorizadas, registrando automáticamente puntos en su campo de visión y calculando las coordenadas espaciales relativas a su posición. Estos puntos forman una *nube de puntos* que describe la geometría tridimensional del objeto escaneado, siendo una herramienta muy útil en campos como la investigación, el diseño, la arqueología, la medicina y el entretenimiento (Ebrahim, 2015).

El funcionamiento de un escáner 3D es similar al de una cámara fotográfica, ya que ambos dispositivos poseen un campo de visión en forma de cono y capturan información sobre superficies visibles. Sin embargo, mientras que una cámara genera una imagen plana, un escáner 3D mide la distancia a las superficies, creando una *imagen* que describe la topografía del objeto. Esta información permite determinar la posición tridimensional de cada punto en la imagen, formando un modelo digital detallado del objeto escaneado (Edl et al., 2018).

Para obtener una representación completa y precisa de un objeto, generalmente se requieren múltiples escaneos desde diferentes ángulos. Estos escaneos deben alinearse y registrarse en un sistema de referencia común, un proceso conocido como *alineación* o *registro*, para crear un modelo completo. Esta serie de pasos es conocida como la *tubería de escaneo 3D* (Moons et al., 2010).

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de sistemas de escaneo que utilizan métodos ópticos para modificar el frente de onda de la luz, como el escaneo de puntos, áreas y franjas. Este método se denomina estructuración de la luz (Ebrahim, 2015).

La estructuración de luz mediante elementos difractivos implica el uso de técnicas ópticas especializadas que manipulan, individual o simultáneamente, la fase, amplitud y dirección de propagación de un haz de luz, para producir patrones específicos. La luz estructurada se refiere al ajuste o conformación de la luz en todos sus grados de libertad, ya sea en tiempo y frecuencia (Rubinsztein-Dunlop et al., 2016). Surge de la capacidad de manipular la luz, haciendo referencia principalmente al control espacial de su amplitud, fase y polarización. Aunque este concepto tiene sus raíces en los primeros diseños de láser, la creación de patrones de luz en su fuente ha experimentado un crecimiento significativo en la última década (Forbes, 2019).

Este avance ha sido impulsado por un conjunto de herramientas modernas que aprovechan la flexibilidad de las estructuras difractivas, cristales líquidos, metasuperficies y metamateriales, junto con diseños láser innovadores. Estas técnicas tienen aplicaciones diversas que incluyen la imagen, la microscopía, el procesamiento de materiales mediante láser y la comunicación óptica (Forbes, 2019). Dos tipos principales de elementos difractivos utilizados para este propósito son las rejillas de difracción y la holografía mediante máscaras de fase o moduladores espaciales de luz (Clark et al., 2016).

Las rejillas de difracción son dispositivos ópticos que consisten en una serie de ranuras o surcos finamente espaciados generalmente en el rango de cientos de nanómetros. Este espaciado se conoce como el período de la rejilla y depende de la longitud de onda de la luz que se va a difractar y de la aplicación en cuestión. Cuando un haz de láser incide sobre una rejilla de difracción, se divide en varios haces secundarios debido

a la interferencia constructiva y destructiva de las ondas de luz (Palmer & Loewen, 2005).

La generación de patrones de luz mediante elementos difractivos presenta varias desventajas importantes. En primer lugar, la intensidad de la luz a lo largo de la línea no siempre es uniforme, lo que puede dar lugar a variaciones en el brillo que afectan la calidad del patrón generado. Esto se debe a la naturaleza misma de la difracción, que divide la luz en diferentes órdenes debido a la interferencia entre las ondas difractadas y puede producir una línea con fluctuaciones en la intensidad de cada uno de los puntos (Hecht, 2017). En segundo lugar, la fabricación de elementos difractivos, como las rejillas de difracción, puede ser compleja, especialmente cuando se requiere una precisión alta para obtener un patrón de luz específico. Además, la operación de estos elementos dependen de la longitud de la onda de la luz incidente y son sensibles a la temperatura, lo que puede afectar el rendimiento y la estabilidad del sistema (Bonod & Neauport, 2016).

Otra desventaja es que, a pesar de que es posible diseñar rejillas de difracción avanzadas que mejoren la continuidad de la línea, la mayoría de las rejillas tradicionales tienden a generar patrones de puntos alineados en lugar de una línea verdaderamente continua (Pedrotti et al., 2018). Esto puede ser un obstáculo en aplicaciones que requieren una iluminación lineal homogénea y sin interrupciones.

Una alternativa a la estructuración de luz por elementos difractivos, es mediante técnicas basadas en elementos refractivos. Un elemento refractivo es aquel que modula la amplitud y fase de la luz mediante la refracción (transmisión) del frente de onda. Es decir, en lugar de dividir un frente de onda, lo deforma en función de la distribución espacial del índice de refracción del elemento óptico. Un ejemplo de este tipo de elementos son las lentes ópticas (Hecht, 2017).

Los elementos ópticos refractivos son capaces de transformar un haz láser puntual en una línea de luz continua y de intensidad homogénea. Esto se logra mediante la redistribución de la luz a lo largo de la línea, sin generar las discontinuidades comunes en los métodos difractivos (Bewsher & Boland, 1994).

Además, los métodos refractivos no dependen de la longitud de onda de la fuente láser, lo que los hace más versátiles y estables en diversas condiciones operativas. Esto significa que los sistemas que utilizan este tipo de lentes pueden funcionar con diferentes fuentes de luz láser sin necesidad de recalibración o ajuste significativo, lo que les otorga una mayor flexibilidad y confiabilidad.

Para generar una línea de luz continua a partir de un láser, se necesita utilizar métodos ópticos que permitan expandir el haz puntual en una línea uniforme y continua. Dos métodos efectivos para lograr esto son el uso de lentes cilíndricas y lentes de Powell.

Las lentes cilíndricas poseen curvatura en una dirección y son planas en la dirección perpendicular. Cuando un haz láser pasa a través de una lente cilíndrica, se expande en una línea en la dirección de la curvatura. Este método es sencillo y efectivo, aunque la distribución de la intensidad de la luz a lo largo de la línea puede no ser completamente uniforme, ya que presentan aberración óptica de barril, disminuyendo la intensidad en los extremos de la línea de luz. Esto podría no ser adecuado para aplicaciones que requieran iluminación homogénea a lo largo de toda la línea.

Otra alternativa para generar líneas de luz continuas es empleando las denominadas lentes Powell. Estas lentes están específicamente diseñadas para convertir un haz Gaussiano en una línea con intensidad uniforme a lo largo de toda la línea (Powell, 1987). A diferencia de las lentes cilíndricas, las lentes de Powell corrigen la intensidad del haz para evitar variaciones en el brillo a lo largo de la línea. Esto es especialmente útil en aplicaciones que requieren una iluminación lineal homogénea.

1.1. Hipótesis

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, resulta natural suponer que se podría desarrollar un sistema de escaneo óptico 3D empleando una línea de luz continua generada a partir de elementos ópticos refractivos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema optomecatrónico que permita reconstruir tridimensionalmente la superficie de un objeto reflejante por medio de la proyección de haces de luz estructurados mediante elementos ópticos refractivos.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica y el estado del arte en el campo de la metrología óptica y reconstrucción digital tridimensional de objetos.

2. Desarrollar un sistema experimental que utilice la proyección de haces de luz estructurados mediante elementos ópticos refractivos para la reconstrucción tridimensional de la superficie de un objeto reflejante.
3. Realizar la validación experimental del escáner.
4. Elaborar conclusiones basadas en los resultados, discutiendo la validez o no de nuestra hipótesis.

1.3. Metodología

Para alcanzar estos objetivos, se desarrolló la siguiente metodología:

1. Se analizaron los fundamentos ópticos que permiten la estructuración de los haces de luz y se determinaron las condiciones necesarias para la generación y adquisición de los datos del sistema.
2. Se desarrolló un sistema experimental en el laboratorio para validar la técnica de triangulación láser. Se ensamblaron y configuraron los componentes ópticos, electrónicos y computacionales necesarios para la reconstrucción tridimensional.
3. Se realizaron pruebas en condiciones controladas para evaluar la viabilidad del método propuesto. Se analizaron los datos obtenidos, con énfasis en la repetibilidad y precisión del sistema en su estado experimental.

En este documento se describe el trabajo realizado en esta investigación, el cual está distribuido como sigue.

En el Capítulo 2, se profundiza en la teoría detrás de los escáneres ópticos 3D, explorando el proceso de reconstrucción de objetos, diferentes técnicas de medición y control, y métodos utilizados para la reconstrucción de superficies en 3D. También se presenta una descripción de los haces estructurados de luz, comparando métodos difractivos y refractivos, y se discuten los sistemas mecatrónicos que permiten el control de los escáneres.

En el Capítulo 3, se detalla el desarrollo de un sistema de escaneo 3D basado en haces de luz estructurados. Se describen los elementos ópticos utilizados para generar líneas de luz continuas y el arreglo óptico del sistema. Además, se cubre el funcionamiento del sistema mecatrónico y el proceso de control a través

de Arduino, así como el diseño y fabricación de carcasas mediante impresión 3D. También se presentan resultados del sistema de escaneo desarrollado, incluyendo imágenes y datos sobre la resolución lograda.

Finalmente en el Capítulo 4 se describen las conclusiones del trabajo, así como limitaciones y alcances del sistema, áreas de oportunidad y trabajo a futuro.

Capítulo 2. Marco teórico: escáner óptico 3D

Un escáner 3D es un dispositivo diseñado para capturar la geometría de un objeto físico y convertirla en una representación digital tridimensional. Este proceso implica el uso de tecnologías ópticas y de procesamiento digital de imágenes que permiten medir y registrar la superficie del objeto mediante la captura de puntos de referencia en el espacio (Haleem et al., 2021). Generalmente, un escáner 3D se compone de los siguientes elementos:

- Sistema óptico: proyecta y detecta patrones de luz sobre el objeto.
- Sistema de control o mecatrónico: mueve al objeto o el propio escáner para obtener capturas de diferentes ángulos.
- Sistema de cómputo: procesa los datos y los transforma en una nube de puntos que representa la superficie del objeto en tres dimensiones.

La nube de puntos es esencial en el proceso de reconstrucción tridimensional, ya que constituye la base para construir un modelo digital del objeto escaneado. Esta nube consiste en una colección de puntos espaciales con coordenadas específicas (x , y , z), obtenidos al medir la distancia entre el escáner y los diferentes puntos en la superficie del objeto. Esta nube se genera a partir de la captura de múltiples imágenes o perfiles desde diferentes perspectivas, lo que permite crear una representación detallada y precisa de la geometría completa del objeto. En este sentido, la densidad y precisión de la nube de puntos, son factores determinantes en la resolución y el nivel de detalle del modelo final.

La Figura 1 presenta el diagrama de bloques de las etapas necesarias para el desarrollo de un escáner óptico tridimensional. Los pasos involucran la definición de las técnicas de medición, el diseño y desarrollo del sistema óptico, mecatrónico y de cómputo, así como la etapa de reconstrucción digital. Cada bloque muestra cómo los diferentes sistemas y procedimientos se interrelacionan para alcanzar el objetivo de crear un modelo 3D.

A continuación, se detallarán los componentes específicos del sistema desarrollado en esta tesis. Están segmentados en elementos ópticos, elementos mecatrónicos, y elementos de procesamiento computacional. Estos elementos trabajan en conjunto para capturar, procesar y reconstruir la geometría tridimensional del objeto.

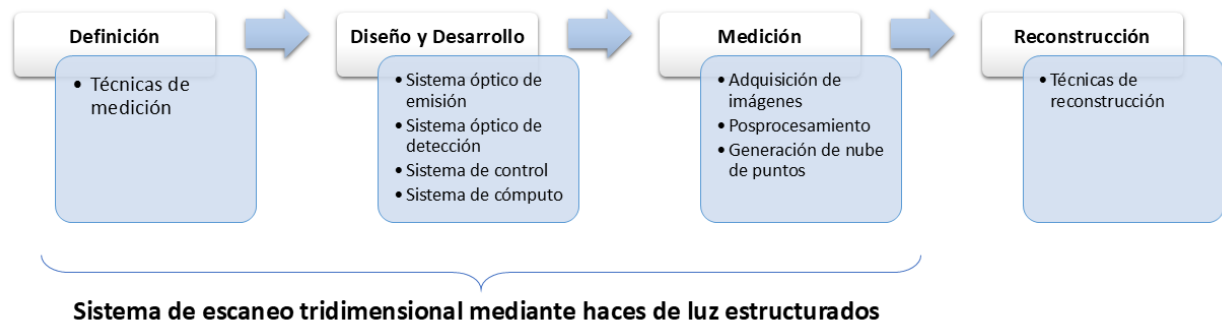


Figura 1. Diagrama de bloques de las etapas de desarrollo del sistema de escaneo óptico tridimensional.

2.1. Técnicas ópticas de medición

El conjunto de técnicas que permite obtener información sobre la geometría de objetos mediante el análisis de la luz proyectada sobre ellos, es conocida como telemetría óptica. La telemetría óptica es ampliamente utilizada en aplicaciones de medición sin contacto directo, como el escaneo de grandes áreas en topografía o el modelado detallado en ingeniería y manufactura.

Existen técnicas como el tiempo de vuelo (Time-of-Flight - ToF), la proyección de franjas, la fotogrametría, la interferometría de auto-mezcla (Self-mixing interferometry) y la triangulación láser. Cada una de estas técnicas ofrece ventajas específicas para distintas aplicaciones y condiciones de escaneo, lo que les ha dado gran aceptación en la industria y en el ámbito de la investigación.

El tiempo de vuelo (ToF), utiliza un láser continuo o un pulso de luz para medir el tiempo que tarda en reflejarse desde el objeto hasta el sensor. A partir del tiempo de retorno, es posible calcular la distancia y generar un modelo tridimensional, siendo un método común en el escaneo de grandes superficies, como en topografía y arquitectura (May et al., 2009).

La proyección de franjas es una técnica que proyecta franjas de luz sobre la superficie del objeto. La deformación del patrón permite deducir la geometría del objeto. Es adecuada para aplicaciones que requieren alta precisión en objetos de tamaño pequeño a mediano (Rocchini et al., 2001).

La fotogrametría utiliza imágenes capturadas desde múltiples ángulos para reconstruir un modelo tridimensional. Mediante algoritmos de procesamiento digital de imágenes se calculan las coordenadas tridimensionales de cada punto relevante, lo cual es particularmente útil en situaciones donde el escaneo directo no es posible, como en grandes objetos o áreas de difícil acceso (Leberl et al., 2012).

La interferometría de auto-mezcla aprovecha la retroalimentación óptica cuando un láser se refleja en la superficie de un objeto y regresa a la cavidad láser. Las interferencias generadas en el proceso permiten calcular las distancias con alta precisión (Donati & Norgia, 2018).

La triangulación láser es una técnica que utiliza una fuente de luz, como un láser, un LED de alta potencia o incluso un proyector, que ilumina el objeto de interés. El receptor, colocado en una posición lateral con respecto a la fuente, capta la luz reflejada por el objeto, formando un triángulo entre la fuente, el objeto y el receptor. Mediante el cálculo de ángulos y posiciones, es posible determinar la distancia precisa entre el objeto y el sensor, y construir un modelo tridimensional del mismo (Fonseca et al., 2017).

En esta tesis se emplea la triangulación láser con luz estructurada. Esta técnica fue seleccionada debido a su compatibilidad con la estructuración de luz y su capacidad para proporcionar información de la superficie del objeto sin contacto físico, lo cual es especialmente beneficioso para estructuras delicadas o complejas. Así mismo, en los laboratorios de la Unidad Académica de Monterrey de CICESE se contaba con los elementos ópticos necesarios para su desarrollo, como son el emisor de luz (láser de helio-neón), detector (cámara CMOS) y las lentes necesarias para la estructuración de luz. Por otra parte, aunque la interferometría es una técnica de telemetría óptica precisa, presenta ciertas desventajas en comparación con la triangulación láser: la alta sensibilidad a vibraciones y la necesidad de condiciones ambientales controladas, razón por la que no ha sido nuestra elección.

Figura 9 Como se describe en la Figura 2 esta disposición triangular entre el láser, la cámara y el objeto a escanear es crucial para el funcionamiento del sistema. Cuando el láser proyecta luz sobre la superficie del objeto, la cámara, ubicada en un ángulo predeterminado, obtiene la desviación de ésta. Con la información recopilada, es posible calcular la geometría tridimensional del objeto.

En la Figura 2a, se muestra el estado inicial del método de triangulación láser. Aquí, la fuente de luz láser proyecta un haz sobre el objeto a escanear, en este caso una pantalla de referencia. El patrón de luz proyectado es modificado por la geometría del objeto y la cámara que está posicionada en ángulo respecto a la dirección de la fuente de luz, obtiene una imagen. El ángulo formado entre el láser, el objeto y la cámara es fundamental para obtener una representación precisa de la topografía del objeto.

Si observamos la Figura 2b, se ilustra lo que ocurriría si el objeto o la pantalla de referencia se mueven hacia adelante o hacia atrás respecto a la cámara y la fuente de luz. Esto genera un cambio en el ángulo de incidencia del haz sobre la superficie del objeto, lo cual produce diferentes trayectorias para el haz reflejado y, por lo tanto, un cambio en la imagen obtenida.

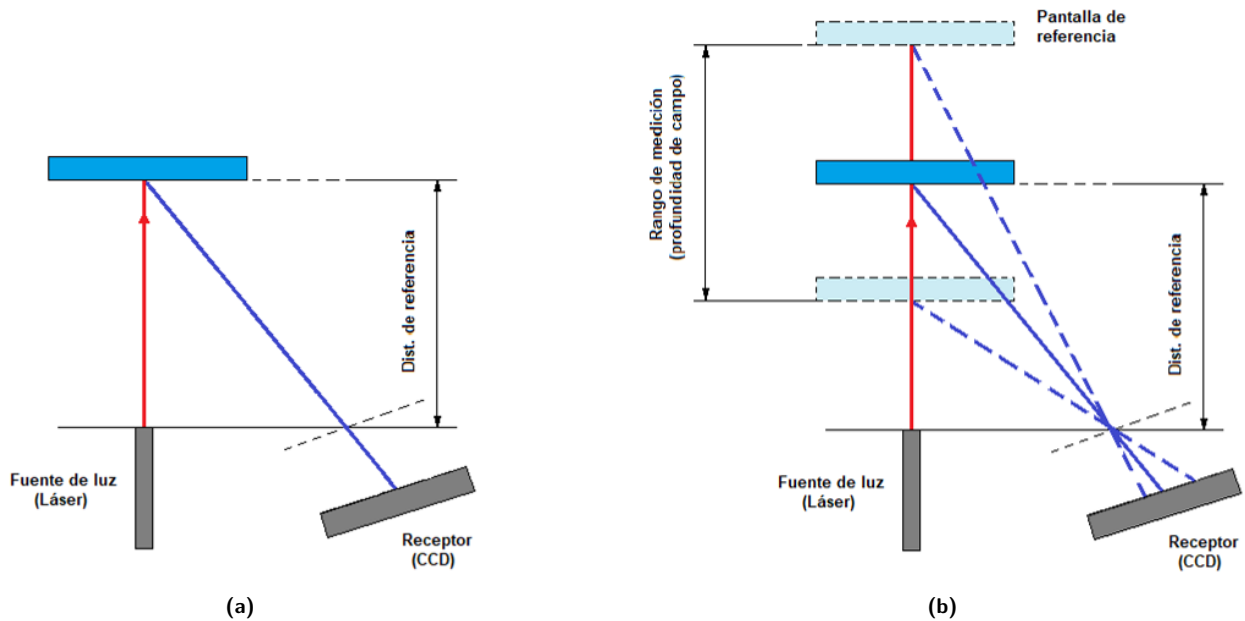


Figura 2. Técnica de triangulación láser. (a) La luz reflejada por el objeto incide en un punto sobre la cámara. (b) Cuando el objeto se desplaza hacia atrás, el punto reflejado sobre la cámara se desplaza a la izquierda, y hacia la derecha cuando el objeto se desplaza hacia adelante.

2.2. Sistema óptico de detección de luz: sistema formador de imágenes

La captura de imágenes es el proceso que permite obtener los datos visuales necesarios para generar un modelo digital. Para ello se necesita un sistema formador de imágenes.

Un sistema formador de imágenes es un conjunto de componentes ópticos diseñado para capturar y proyectar información visual hacia un detector. Este sistema consta, principalmente, de un conjunto de lentes que forman y enfocan una imagen; y de un detector, que convierte la luz captada en señales digitales (Bernd et al., 2012).

El sistema de lentes utilizado en este trabajo fue el MVL25M23 de Navitar diseñado específicamente para aplicaciones de captura de imágenes con corrección al infinito. Con una distancia focal de 25 mm, permite tener un equilibrio entre el campo de visión y la magnificación, sumándose una apertura regulable que permite controlar la cantidad de luz que llega al detector (Rocchini et al., 2001).

Las lentes en el sistema desempeñan el papel de concentrar y dirigir la luz proveniente de la escena u objeto hacia el detector. Según la configuración óptica, el sistema puede ajustar la distancia focal y la apertura para garantizar que la imagen proyectada en el detector sea nítida y clara.

Entre los detectores más utilizados se encuentran los sensores CCD y los sensores CMOS, ambos ampliamente utilizados en sistemas de escaneo tridimensional debido a su capacidad para captar luz y convertirla en señales eléctricas (Young et al., 2009).

En este trabajo se utilizó una cámara con sensor del tipo CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) modelo DCC1645C de Thorlabs. Éstos son una tecnología más reciente y eficiente en términos de costo y consumo de energía. A diferencia de los CCD, en los sensores CMOS cada píxel tiene su propio convertidor analógico-digital, lo que permite que los datos se procesen de manera más rápida (Turchetta, 2020).

2.3. Sistema óptico de emisión de luz: haces de luz estructurados

En el contexto de un escáner 3D, el emisor de luz es el componente que genera el haz de luz que interactúa con la superficie del objeto a escanear. Entre los distintos tipos de emisores de luz, el láser es preferido en aplicaciones de escaneo 3D debido a sus propiedades de coherencia espacial y temporal que permiten colimar el haz, así como la alta intensidad de su haz. Estas características hacen que el láser sea idóneo para producir un haz controlado y enfocado.

Un láser tiene coherencia temporal y espacial, esto significa que las ondas de luz emitidas están en fase y tienen la misma frecuencia, además la luz está concentrada en una región pequeña del espacio, denominada “spot”.

Si el haz es colimado, los rayos de luz se mantienen paralelos, es decir, ahora el haz es una onda plana y se mantiene sin difracción en cierta región del espacio; esto permite realizar mediciones con mayor precisión ya que su intensidad es uniforme.

La selección del láser como emisor de luz en sistemas de escaneo 3D no solo responde a su precisión, sino también a su capacidad para reducir la influencia de condiciones ambientales, como la luz externa o el ruido óptico, que pueden afectar la calidad de la captura. Por otro lado, el uso de un láser abre la posibilidad de controlar otras propiedades de la luz como su fase, amplitud o polarización. Estas propiedades pueden modificarse mediante elementos ópticos como lentes, rejillas difractivas, pantallas de cristal líquido; este proceso se conoce como estructuración de luz.

2.3.1. Haces de luz estructurados

Los haces estructurados son haces de luz que han sido modificados para tener una distribución espacial específica de intensidad, fase o polarización. Esto permite que sea posible controlar la estabilidad del haz ante perturbaciones del ambiente y utilizarlos para obtener mediciones precisas. La luz estructurada se utiliza en aplicaciones de metrología óptica, manipulación de partículas y escaneo 3D, donde la proyección de patrones de luz es útil para controlar más la interacción de la luz con el material.

El concepto de haces estructurados incluye desde patrones simples, como franjas de luz proyectadas, hasta patrones más complejos que combinan múltiples frecuencias espaciales o distintas fases.

Varios estudios han demostrado la eficiencia de estos haces en técnicas de proyección de patrones. Según (Li et al., 2017), los haces estructurados se pueden utilizar en técnicas como el escaneo tridimensional sin contacto, debido al control sobre la luz proyectada que permite detectar deformaciones sutiles en la superficie de los objetos.

Existen diversas técnicas para la generación de haces estructurados, dependiendo de la aplicación en que serán utilizados. Estas técnicas se dividen principalmente en dos categorías: métodos difractivos y métodos refractivos, ambos con enfoques distintos para modificar el haz de luz.

Los métodos difractivos utilizan elementos ópticos como rejillas de difracción o máscaras de fase para dividir el haz de luz en múltiples haces, creando patrones complejos que pueden ser discontinuos o con múltiples frecuencias espaciales. En estos métodos, la luz se estructura a partir de la interacción con patrones periódicos que modulan su fase o amplitud.

Uno de los elementos más utilizados en esta categoría son los moduladores de fase o amplitud, mediante el uso de hologramas de difracción generados computacionalmente, que se diseñan para generar patrones de luz específicos cuando se proyecta un haz láser sobre ellos. Esto permite crear distribuciones de luz discontinuas, ideales para aplicaciones como la proyección de múltiples puntos o líneas sobre la superficie de un objeto. Estos patrones se capturan posteriormente con cámaras para realizar mediciones de profundidad.

La investigación de (Kim et al., 2012) señala que los sistemas difractivos tienen la ventaja de ser versátiles en la creación de patrones complejos, pero su implementación requiere una alineación precisa y un control detallado de la luz incidente para evitar errores en la proyección, además son costosos.

Por otra parte, los métodos refractivos son otra técnica común para generar haces de luz estructurada, que proporcionan patrones más continuos y suaves. Estos métodos utilizan elementos ópticos como lentes cilíndricas, prismas o lentes Powell para modificar el haz de luz.

Según los estudios de (Angelsky et al., 2021), los métodos refractivos son eficientes para proyectar patrones de luz estructurada en aplicaciones industriales y médicas, donde la precisión y la homogeneidad de la proyección son críticas.

Los patrones generados por haces estructurados pueden variar ampliamente según el método empleado y el tipo de aplicación. A continuación se presentan algunos ejemplos comunes de patrones de luz estructurada utilizados en sistemas de escaneo y medición tridimensional.

- **Franjas sinusoidales:** muy utilizados en la técnica de proyección de franjas, donde una secuencia de patrones sinusoidales proyectados sobre un objeto se utiliza para determinar la forma tridimensional del objeto a partir de la deformación de las franjas.
- **Matrices de puntos:** generadas mediante métodos difractivos, estas matrices permiten obtener múltiples puntos de referencia sobre la superficie de un objeto, facilitando la reconstrucción 3D a partir de múltiples puntos de medición.
- **Proyección de líneas:** utilizadas en aplicaciones como la medición de perfiles, donde la proyección de una línea de luz sobre un objeto permite obtener secciones transversales de su geometría.

La elección del patrón depende de la resolución deseada y del tipo de información que se quiera extraer del objeto. Las diferentes formas de generar líneas de luz presentan ventajas y desventajas según el patrón y el elemento óptico utilizado para generarlo. Las franjas sinusoidales destacan por su alta resolución y precisión, pero requieren complejos sistemas de proyección y análisis computacional. Las matrices de puntos son eficientes para capturas rápidas, aunque tienen menor densidad de datos. La proyección de líneas, elegida en este trabajo, es ideal para medir perfiles con simplicidad y bajo costo computacional.

Para la generación de líneas continuas de luz, diferentes tipos de lentes ofrecen diferentes características según la aplicación. En este trabajo se compararon las lentes cilíndricas, cilíndricas periódicas y Powell, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

- **Lentes cilíndricas (Figura 11a):** estas lentes se utilizan para transformar un haz puntual en una línea al enfocar la luz en una sola dimensión. Sin embargo, las lentes cilíndricas presentan limitaciones,

como una distribución de intensidad no uniforme. La luz es más intensa en la región central de la línea y menos en los bordes, lo que puede resultar en errores de medición (Conrady, 2013).

- Lentes cilíndricas periódicas (Figura 11b): estas lentes son matrices de pequeñas lentes cilíndricas distribuidas periódicamente sobre una superficie plana. Su diseño permite la formación de líneas de luz continuas con una distribución más uniforme en comparación con las lentes cilíndricas simples. Este tipo de lente es particularmente útil en sistemas de escaneo que requieren una intensidad estable y regular a lo largo de la línea proyectada. Además, su periodicidad ayuda a estabilizar la luz en intervalos definidos, lo que mejora la calidad del patrón generado. Sin embargo, es fundamental ajustar adecuadamente la distancia focal para evitar aberraciones o distorsiones que puedan afectar la precisión.
- Lentes Powell (Figura 11c): las lentes Powell son una solución para superar las limitaciones de uniformidad que presentan las lentes cilíndricas. Estas lentes están diseñadas para proyectar líneas de luz con una distribución de intensidad homogénea a lo largo de toda su longitud, gracias a su perfil curvado. Esta característica las hace adecuadas para aplicaciones de escaneo tridimensional que requieren consistencia, como la inspección de superficies. Además, ofrecen una mayor profundidad de foco en comparación con las lentes cilíndricas periódicas, lo que permite mantener la uniformidad de la línea (Powell, 1987).

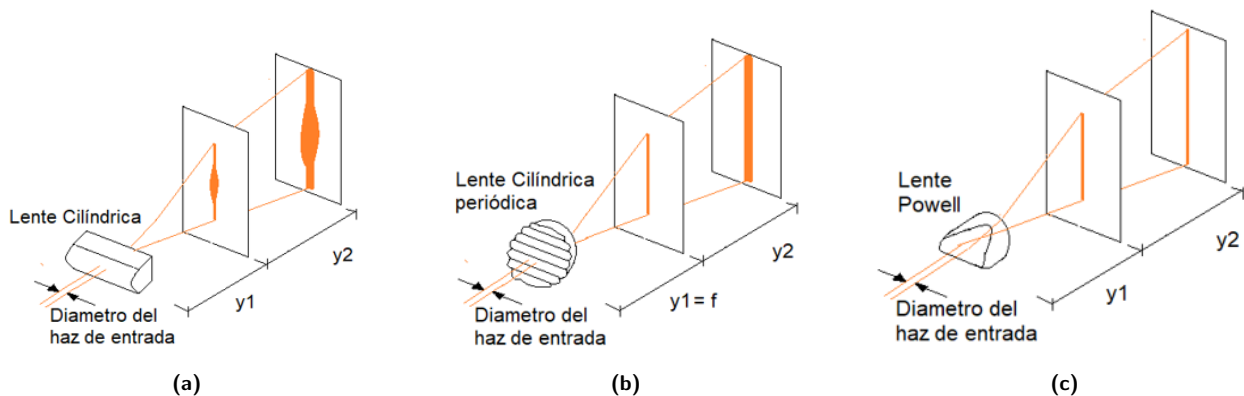


Figura 3. Generación de líneas de luz. En a) se representa la línea de luz generada por la lente cilíndrica la cual concentra la intensidad en el centro. La lente cilíndrica periódica, mostrada en b) puede amplificar y estabilizar la distribución de luz en intervalos regulares, sin embargo tiene una profundidad de foco finita. La lente Powell mostrada en c) permite proyectar líneas de luz con una distribución de intensidad homogénea.

2.4. Sistema mecatrónico

Un sistema mecatrónico es una integración de componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control, cuyo objetivo es realizar tareas complejas de forma eficiente, precisa y en gran medida auto-

matizada. Estos sistemas combinan las disciplinas mencionadas anteriormente (Figura 4), permitiendo que las máquinas interactúen inteligentemente con su entorno y ajusten su funcionamiento en tiempo real (Bolton, 2003). Los avances en la mecatrónica han dado lugar a sistemas con alta capacidad de procesamiento y control, como robots industriales, automóviles autónomos y sistemas de diagnóstico médico, que requieren precisión y velocidad en tareas de detección y acción coordinada (Cortés et al., 2013).

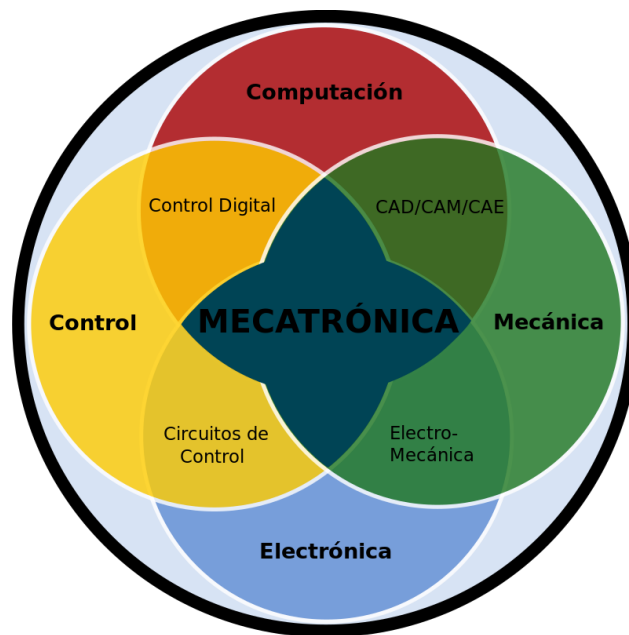


Figura 4. Ramas de la ingeniería mecatrónica.

En el contexto de los escáneres 3D, los sistemas mecatrónicos se utilizan para medir y mapear la geometría de objetos en tres dimensiones. El escáner 3D integra una fuente de luz, como un láser o un proyector, un sistema de detección y una plataforma mecánica para posicionar el objeto o el sensor con precisión (Rocchini et al., 2001). La combinación de sensores ópticos con mecanismos de control y algoritmos de procesamiento permite capturar rápidamente datos tridimensionales, asegurando la calidad y la repetibilidad de las mediciones.

En los escáneres 3D, los sistemas mecatrónicos tienen la función de coordinar el movimiento y el procesamiento de los componentes ópticos y mecánicos, garantizando la precisión y velocidad del escaneo en entornos tridimensionales. Estos sistemas combinan tres funciones esenciales:

1. Posicionamiento del objeto o del sensor: la mecatrónica permite mover el objeto o el sensor en múltiples ejes, asegurando que el haz de luz proyectado (ya sea láser, LED o luz estructurada) incida sobre toda la superficie que se desea digitalizar. Este movimiento controlado es fundamental para

escanear objetos de diferentes geometrías, optimizando el área de escaneo y el tiempo requerido (Logozzo et al., 2018).

2. Sincronización del sistema de captura y el mecanismo de escaneo: los sistemas mecatrónicos sincronizan la fuente de luz y el sensor óptico, de manera que cada captación de datos ocurre en el instante preciso en que el objeto se encuentra en una posición ideal para el escaneo. Esta sincronización permite la adquisición de datos en secuencias rápidas y precisas, reduciendo los errores de posicionamiento y mejorando la calidad del modelo 3D resultante (Fonseca et al., 2017).
3. Procesamiento y transferencia de datos en tiempo real: los sistemas mecatrónicos de escáneres 3D integran módulos de procesamiento que analizan y procesan las imágenes o puntos capturados en tiempo real. Esto incluye operaciones como la calibración del sistema, la conversión de coordenadas y la corrección de distorsiones ópticas. Mediante algoritmos avanzados, se transforma la información en una nube de puntos tridimensional, lo cual permite visualizar la superficie escaneada inmediatamente y con fidelidad geométrica (Soudarissanane et al., 2011).

Un ejemplo representativo del uso de sistemas mecatrónicos en escáneres 3D es el escaneo láser en ingeniería inversa y manufactura aditiva. Estos escáneres permiten obtener geometrías complejas en una fracción del tiempo comparado con métodos convencionales, con aplicaciones en industrias como la automotriz y aeroespacial (Son et al., 2002).

A continuación, se presentarán los sistemas y componentes que conforman el sistema mecatrónico de nuestro escáner 3D. Desde los mecanismos de posicionamiento y las fuentes de luz, hasta los sistemas de sincronización y procesamiento de datos, cada componente contribuye a la obtención de modelos 3D de alta fidelidad. Esta revisión permitirá comprender cómo se integra y coordina cada sistema para lograr una digitalización de los objetos.

2.4.1. Electromecánica: motor a pasos

El funcionamiento de un motor a pasos se basa en la conversión de señales eléctricas en movimiento rotativo discreto, controlado de manera precisa por una serie de impulsos eléctricos. Está compuesto principalmente por un rotor, la parte móvil, y un estator, la parte fija. El motor gira en incrementos angulares discretos, llamados pasos. Cada paso se produce cuando un impulso eléctrico activa una de las bobinas del estator, lo que genera un campo magnético que atrae los polos magnéticos del rotor hacia

una posición específica. A medida que las bobinas se energizan en secuencia, el rotor se mueve paso a paso en la dirección del campo magnético resultante (Grant, 2005).

A diferencia de los servomotores, los motores a pasos no necesitan retroalimentación para el control de posición, ya que su rotación es directamente proporcional al número de impulsos eléctricos recibidos. Este comportamiento permite un control de la posición y velocidad sin el uso de un sensor de posición. Su funcionamiento puede ser controlado por un driver de motor a pasos el cual regula el flujo de corriente hacia las bobinas del motor, garantizando una secuencia correcta de activación (Condit & Jones, 2004).

En escáneres 3D, los motores a pasos son comúnmente utilizados para controlar el movimiento de los objetos que se van a escanear. Estos motores permiten que el objeto se mueva en pequeños incrementos, facilitando la captura de múltiples perspectivas para permitir que cada parte del objeto sea escaneada. Gracias a su capacidad para realizar movimientos discretos y repetibles, los motores a pasos permiten que el objeto esté en la posición correcta durante todo el proceso de escaneo. Este nivel de control es crucial para la obtención de una nube de puntos que resultará en una reconstrucción tridimensional. La fácil integración con circuitos de control, hace que estos motores sean una opción ideal para aplicaciones industriales y de prototipado en sistemas de escaneo 3D.

2.4.2. Circuito de control y control digital

El sistema de control digital empleado para desplazar los motores fue Arduino. El control con Arduino se basa en la capacidad de este microcontrolador para controlar motores a pasos de manera precisa y sincronizada. En el contexto de un escáner 3D, Arduino actúa como el cerebro del sistema mecatrónico, gestionando el movimiento del objeto mientras se escanea y asegurando que se realice de manera estable y controlada (Parmar et al., 2017).

En la programación del código de Arduino se pueden definir los parámetros de movimiento como la velocidad, dirección, y los pasos por revolución. Además, se puede programar la secuencia de escaneo, permitiendo que el objeto gire automáticamente mientras el sistema óptico captura los datos. Adicionalmente, cuenta con una interfaz de usuario básica para ajustar los parámetros de escaneo, lo que facilita su operación (Villa Fernández, 2020).

2.4.3. Diseño y manufactura asistidos por computadora

La tecnología de impresión 3D complementa este proceso al permitir la creación rápida de prototipos y estructuras personalizadas para sistemas de escaneo. La impresión 3D es una tecnología de fabricación aditiva que ha revolucionado múltiples industrias, desde la manufactura y el diseño hasta la medicina y la investigación científica (Aycardi Salgado & Tuirán Moreno, 2018). Este proceso consiste en la creación de objetos tridimensionales a partir de un modelo digital, depositando material capa por capa hasta obtener el objeto final. A diferencia de los métodos tradicionales de manufactura, que tienden a ser sustractivos (es decir, eliminan material para dar forma), la impresión 3D permite un uso eficiente del material y una mayor flexibilidad en el diseño (Tofail et al., 2018). Entre los procedimientos de impresión 3D más comunes se encuentran la estereolitografía (SLA), el sinterizado selectivo por láser (SLS), y la fabricación por filamento fundido (FFF), también conocida como FDM (Fused Deposition Modeling) (Shahrubudin et al., 2019).

Los métodos de impresión 3D difieren principalmente en la forma en que el material es depositado y en el tipo de material que se utiliza. La Fabricación por Filamento Fundido (FFF/FDM), es el método más accesible y ampliamente utilizado en la impresión 3D. Consiste en el calentamiento y extrusión de un filamento termoplástico, generalmente a través de una boquilla que deposita el material capa por capa (Caminero et al., 2018).

Existen diversos materiales que pueden ser utilizados en la impresión 3D, dependiendo de las necesidades de la aplicación. Los más comunes son los plásticos termoplásticos como el PLA, ABS, PETG, y nylon, aunque también es posible utilizar metales, resinas y, en algunos casos, incluso materiales biocompatibles (Low et al., 2017).

En particular el (Ácido Poliláctico) es uno de los materiales más populares debido a su facilidad de uso. El PLA es un polímero biodegradable derivado de recursos naturales como el maíz, lo que lo convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente. Este material es ideal para prototipos y piezas que no requieren una alta resistencia mecánica (Dizon et al., 2018).

En el desarrollo de nuestro sistema, se optó por la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) debido a su accesibilidad y bajo costo en comparación con otros métodos de impresión. Además, se utilizó PLA como material para la estructura de soporte debido a sus ventajas en términos de facilidad de impresión, resistencia adecuada para soportar los componentes electrónicos y estabilidad dimensional.

La impresión 3D ha sido ampliamente utilizada en el campo del escaneo 3D y la fabricación de sistemas de medición. Estudios previos han mostrado cómo la impresión 3D ha permitido la creación rápida de prototipos y estructuras personalizadas que facilitan el desarrollo de sistemas ópticos complejos. En aplicaciones similares, investigadores como (Lipson & Kurman, 2013) destacan cómo la impresión por filamento fundido ha sido clave para la creación de estructuras mecánicas económicas, útiles en entornos de investigación y desarrollo.

2.5. Procesamiento digital de imágenes: generación de nube de puntos

La reconstrucción digital en sistemas de escaneo 3D es el proceso de convertir la información capturada por sensores ópticos en un modelo tridimensional digital, que intenta representar lo más fiel posible la geometría y/o textura de un objeto físico. Esta etapa es de relevancia para aplicaciones de ingeniería inversa, prototipado, conservación del patrimonio cultural, e incluso en la fabricación digital. A través de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y algoritmos matemáticos, el objetivo es transformar la nube de puntos generada durante el escaneo en una representación digital suficientemente precisa y utilizable (Gomes et al., 2014).

2.5.1. Algoritmo de lectura y seleccion de datos

En el ámbito de la reconstrucción tridimensional, la selección de puntos relevantes a partir de imágenes capturadas por escáneres 3D es un proceso clave. Este paso garantiza que solo se procesen los datos útiles, buscando la optimización en la generación de modelos tridimensionales. Entre los métodos disponibles, los algoritmos geométricos que priorizan puntos de mayor intensidad destacan por su simplicidad, eficiencia y adecuación para tareas de precisión.

La selección de puntos en imágenes capturadas implica identificar características específicas, como brillo, contraste y nitidez, que aseguren la calidad de los datos procesados. Factores como el ruido, la redundancia, y las condiciones del entorno como la iluminación y reflectividad del objeto, también deben considerarse para optimizar los resultados.

El método implementado en este trabajo se basa en algoritmos geométricos que seleccionan los puntos

de mayor intensidad en una imagen. Estos algoritmos priorizan características visuales prominentes que, por su intensidad, son más fáciles de identificar y seguir en múltiples vistas. Estos algoritmos funcionan de la siguiente manera:

- Identificación de máximos locales: se procesan los datos para localizar las áreas de mayor intensidad dentro de la imagen.
- Criterios de selección: se aplican filtros geométricos para excluir puntos aislados o inconsistentes con la forma general del objeto.
- Generación de puntos clave: los puntos seleccionados representan una nube de datos tridimensional que describe con precisión la superficie del objeto escaneado.

Las ventajas del enfoque geométrico, es que los algoritmos son menos demandantes en términos de recursos computacionales que los métodos basados en aprendizaje automático. Éstos requieren menos etapas de preprocesamiento y calibración, y son robustos en condiciones de escaneo controladas como sistemas láser.

Aunque existen técnicas más avanzadas como las redes neuronales para el procesamiento de imágenes, su implementación conlleva mayores costos computacionales y depende de un entrenamiento previo con grandes conjuntos de datos. Por otro lado, los algoritmos geométricos son ideales para sistemas que requieren una operación ágil y eficiente, como el desarrollado en este trabajo.

El uso de algoritmos geométricos centrados en puntos de intensidad constituye una solución efectiva para la reconstrucción tridimensional en aplicaciones donde se priorizan la precisión y la rapidez. Este enfoque, combinado con un procesamiento adecuado de las imágenes capturadas, pretende asegurar la calidad del modelo 3D generado.

2.5.2. Algoritmo de generación de nube de puntos

Una nube de puntos es un conjunto de puntos distribuidos en el espacio tridimensional, donde cada punto representa una coordenada espacial (X, Y, Z) . Estos puntos se obtienen mediante la captura de la superficie del objeto escaneado, y reflejan la geometría de esa superficie de forma precisa y detallada.

Estas son generadas como el resultado de las distintas técnicas de reconstrucción mencionadas en la Sección 2.1.

La densidad de una nube de puntos se refiere al número de puntos por unidad de área que se capturan en la superficie del objeto. Cuanto mayor sea la densidad, mayor será el detalle y la precisión en la representación de la superficie. Sin embargo, una mayor densidad también aumenta el tamaño del archivo y el procesamiento requerido. Aunque las nubes de puntos proporcionan un alto nivel de detalle, presentan desafíos como la gestión de grandes volúmenes de datos y la necesidad de un procesamiento computacional intensivo. También es fundamental reducir el ruido en las capturas y asegurar una buena alineación de los componentes ópticos.

Estudios como los de (Beraldin et al., 2000) han explorado la generación y optimización de nubes de puntos en contextos de alta precisión y densidad, como la documentación de artefactos históricos. También en (Rusinkiewicz & Levoy, 2001), a partir de múltiples nubes de puntos, se destacó el uso del algoritmo ICP (Iterative Closest Point) para la alineación y la creación de modelos tridimensionales precisos.

En esta tesis, para obtener la nube de puntos, se empleó la transformación a coordenadas cilíndricas debido a la simetría de revolución axial del sistema de escaneo utilizado. Este enfoque permite representar los datos capturados, facilitando el análisis y procesamiento de la geometría del objeto. En la Figura 5 se puede apreciar los componentes del sistema de coordenadas empleado.

La conversión a coordenadas 3D es una técnica clave en la reconstrucción tridimensional de objetos a partir de los datos obtenidos en el proceso de escaneo. En lugar de utilizar el sistema tradicional de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) , se emplean sistemas de coordenadas cilíndricas o esféricas dependiendo de la geometría del objeto o del método de escaneo, para una mejor representación y análisis de los datos (Wijaya et al., 2022).

Para el proceso de conversión primeramente se capturan los puntos del objeto los cuales se encuentran en coordenadas cartesianas. Luego se le aplican las ecuaciones de transformación a coordenadas cilíndricas.

$$x = r * \cos(\theta) \quad (1)$$

$$y = r * \sin(\theta) \quad (2)$$

$$z = z \quad (3)$$

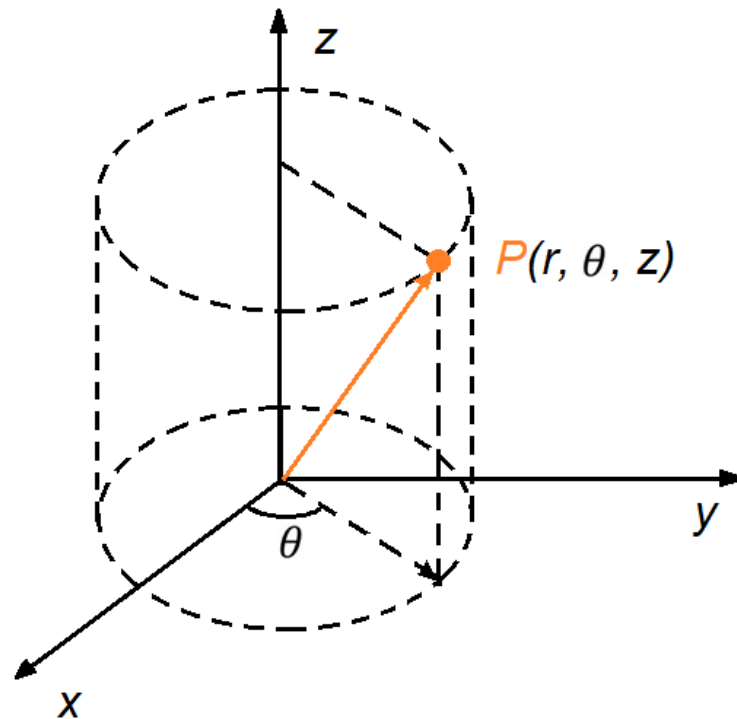


Figura 5. Coordenadas cilíndricas. r : Distancia radial desde el eje central (equivalente a X y Y en coordenadas cartesianas, pero en forma polar) θ Ángulo entre el vector y el eje X en el plano XY (coordenada angular). Z : Altura o desplazamiento vertical, igual que en el sistema cartesiano.

2.5.3. Reconstrucción digital

La reconstrucción digital es la etapa culminante en el proceso de escaneo tridimensional, donde los datos obtenidos, generalmente en forma de una nube de puntos, se transforman en un objeto digital tridimensional completo (Han et al., 2017).

Durante el escaneo, se generan miles o millones de puntos que representan la superficie del objeto escaneado. Estos puntos contienen coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) que describen la geometría de la superficie capturada. Debido a imperfecciones en el proceso de captura, es posible que algunos puntos de la nube contengan ruido o errores. A través de técnicas de procesamiento de datos, como la eliminación de puntos erróneos y la interpolación de datos faltantes, se optimiza la precisión de la nube de puntos. Por mencionar algunos, en (Kurup & Bos, 2021) utilizan el método de filtrado estadístico, el cual se basa en calcular la media y la desviación estándar de la distancia de cada punto a sus vecinos cercanos, eliminando aquellos puntos que se desvían significativamente de los valores promedio. En (Zhang et al., 2003) emplean otro método basado en el radio de vecindad que consiste en eliminar los puntos que no tienen una cantidad mínima de vecinos dentro de un radio específico.

Una vez que la nube de puntos está filtrada, se procede a la creación de una malla tridimensional. Esta malla se genera conectando los puntos de la nube mediante polígonos, generalmente triángulos, que permiten formar una superficie continua y suave. Para realizar este proceso, se utilizan algoritmos como Delaunay triangulation empleado en (Golias & Tsiboukis, 1994) o el marching cubes desarrollado en (Lorensen & Cline, 1998), dependiendo de la naturaleza de los datos y del nivel de detalle deseado.

Finalmente, el modelo 3D generado puede ser optimizado para reducir la cantidad de polígonos sin perder calidad visual, lo que es crucial para aplicaciones que requieren modelos ligeros, como la realidad aumentada, impresión 3D o animación digital. Este proceso puede incluir la reducción de polígonos mediante simplificación de mallas, utilizado en (Wang et al., 2019), para mejorar la calidad del modelo.

Los pasos y métodos para la generación de un modelo 3D, incluyendo la filtración y reducción de ruido en nubes de puntos, pueden llevarse a cabo en diversos medios y plataformas de software. Entre los más destacados se encuentran MATLAB, un entorno de programación potente para el procesamiento de datos tridimensionales, donde es posible implementar algoritmos personalizados para la filtración de ruido y la optimización de mallas.

Una vez obtenida la nube de puntos mediante el escaneo 3D, el siguiente paso es la reconstrucción digital del objeto escaneado. Este proceso convierte los datos en una representación tridimensional continua y coherente, esencial para generar modelos precisos que puedan ser utilizados en aplicaciones como la ingeniería inversa, el diseño asistido por computadora (CAD), la manufactura aditiva, y el análisis científico (Akdim et al., 2022). A lo largo de los años, diversas técnicas han sido desarrolladas para llevar a cabo esta reconstrucción de manera eficiente, cada una con diferentes enfoques y aplicabilidad según las características de la nube de puntos.

1. Interpolación de superficies

La interpolación es uno de los métodos más básicos para la reconstrucción de superficies a partir de nubes de puntos. A través de la generación de superficies continuas que pasan a través de los puntos escaneados, se obtiene una aproximación suave del objeto. Entre los algoritmos de interpolación más utilizados está el de Delaunay Triangulation, que genera una malla triangular a partir de la nube de puntos (Lin et al., 1989; Müller & Klingert, 1991).

La interpolación tiene el beneficio de ser conceptualmente simple, pero a menudo requiere una gran densidad de puntos para garantizar una reconstrucción precisa. La calidad del resultado depende significativamente de la distribución uniforme de los puntos en la superficie del objeto, lo que puede no ser siempre posible en casos reales (Chen et al., 1991).

2. Método de superficies a partir de contornos (Surface Reconstruction from Contours)

Este método se basa en la construcción de superficies a partir de la información obtenida en planos secuenciales del objeto. Utilizando algoritmos que conectan los puntos de cada plano, se generan contornos que luego se combinan para formar una superficie tridimensional.

Este enfoque es particularmente útil en sistemas que generan capas de datos, como los sistemas de escaneo basados en tomografía o fotogrametría. Su precisión depende de la cantidad de contornos disponibles y de la calidad de los algoritmos utilizados para conectar los contornos entre planos. Un algoritmo destacado en este contexto es el Marching Cubes, que ha sido ampliamente utilizado para la generación de superficies a partir de volúmenes en diferentes áreas como la medicina (Lorensen & Cline, 1998).

3. Método de ajuste de superficies paramétricas (Surface Fitting)

Este enfoque consiste en ajustar superficies paramétricas a la nube de puntos, lo que permite modelar el objeto utilizando ecuaciones matemáticas. Las superficies paramétricas más comunes incluyen superficies de Bézier, superficies B-spline, y las NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

La ventaja de las NURBS es su flexibilidad y capacidad para representar formas geométricas complejas, desde superficies suaves hasta bordes duros. Sin embargo, este método requiere de una buena cantidad de puntos y un ajuste adecuado de las funciones para evitar distorsiones en la superficie final. Según estudios de (Piegl & Tiller, 2012), las NURBS son ampliamente utilizadas en aplicaciones de ingeniería, diseño industrial y animación por su capacidad para representar formas precisas y complejas.

4. Reconstrucción mediante mallas poligonales

Uno de los métodos más populares para la reconstrucción digital es la generación de mallas poligonales a partir de la nube de puntos. Algoritmos como el Ball Pivoting Algorithm (BPA) y el Poisson Surface Reconstruction se utilizan para conectar los puntos en una estructura de malla triangular que representa la superficie del objeto.

Ball Pivoting Algorithm (BPA): Este algoritmo utiliza una esfera que se mueve a través de los puntos, "pivotando" sobre los puntos de contacto, para generar la malla triangular. Este método es robusto para superficies con agujeros o áreas con baja densidad de puntos, pero puede generar resultados menos precisos en zonas de alta curvatura (Bernardini et al., 1999).

Poisson Surface Reconstruction: Este algoritmo reconstruye superficies a partir de una nube de puntos en función de un campo vectorial normal. Es especialmente útil para crear superficies

suaves y continuas, y puede manejar densidades variables de puntos. Sin embargo, puede requerir post-procesamiento para eliminar artefactos como pequeños agujeros o ruidos en la malla.

Estudios realizados por (Kazhdan et al., 2006) mostraron que la reconstrucción mediante el algoritmo Poisson es particularmente útil cuando se necesita una malla continua y suave a partir de datos con ruido.

5. Reconstrucción mediante técnicas de fotogrametría

Otra técnica de reconstrucción que ha ganado mucha popularidad en la última década es la fotogrametría. Aunque normalmente se utiliza para generar la nube de puntos, también se puede usar para realizar la reconstrucción digital del objeto tridimensional. A través de múltiples imágenes capturadas desde diferentes ángulos y aplicando algoritmos de correlación de imágenes, se puede generar un modelo 3D completo.

La fotogrametría tiene la ventaja de requerir equipo relativamente simple (una cámara digital), en (Struck et al., 2019) describen su aplicación en la ciencia biomédica. También se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de arqueología, modelado de paisajes y arquitectura como se muestra en trabajos como (Moyano et al., 2020). Sin embargo, su precisión puede ser limitada dependiendo de la calidad y número de imágenes capturadas.

Capítulo 3. Sistema de escaneo tridimensional mediante haces de luz estructurados

En el presente capítulo se describe el desarrollo del sistema de escaneo tridimensional basado en la proyección de haces de luz estructurados. Veremos los detalles del sistema óptico, explicando cómo se configuran los diferentes componentes para proyectar los patrones de luz. Posteriormente, se describe el sistema mecatrónico que realizará el movimiento de los objetos, abordando su diseño y fabricación. Finalmente, se muestra el proceso de reconstrucción digital, desde la captura de las fotografías del objeto, la generación de la nube de puntos hasta la conversión de los datos y la creación de un modelo digital.

3.1. Caracterización del sistema de telemetría óptica por triangulación

Entre las diferentes técnicas de medición utilizadas para la captura tridimensional de superficies, se ha optado por la triangulación láser debido a su simplicidad en la implementación. A diferencia de otras técnicas como la interferometría, la triangulación láser permite obtener resultados suficientemente precisos sin requerir equipos sofisticados o complejas configuraciones ópticas. Esto la convierte en una opción ideal para nuestro sistema.

Habiendo seleccionado la técnica de escaneo mediante triangulación láser y habiendo configurado los componentes ópticos de nuestro sistema (láser HeNe, cámara CMOS y lente), se procedió a la siguiente etapa del proceso: la caracterización y validación del sistema óptico. Esto fue necesario para asegurarnos de que los parámetros de escaneo proporcionaran una resolución adecuada para la reconstrucción tridimensional del objeto.

Para llevar a cabo la caracterización del sistema, se evaluaron tres configuraciones distintas:

1. Fuente de luz láser perpendicular al objeto (Figura 6a): en esta disposición, el láser está alineado perpendicularmente a la superficie del objeto, mientras que la cámara es posicionada en un ángulo con respecto al objeto.
2. Cámara perpendicular al objeto (Figura 6b): en esta configuración, la cámara está alineada perpendicularmente al objeto, mientras que el láser se encuentra en ángulo.
3. Ambos elementos en ángulo (Figura 6c): tanto la fuente de luz láser como la cámara están en ángulo respecto al objeto.

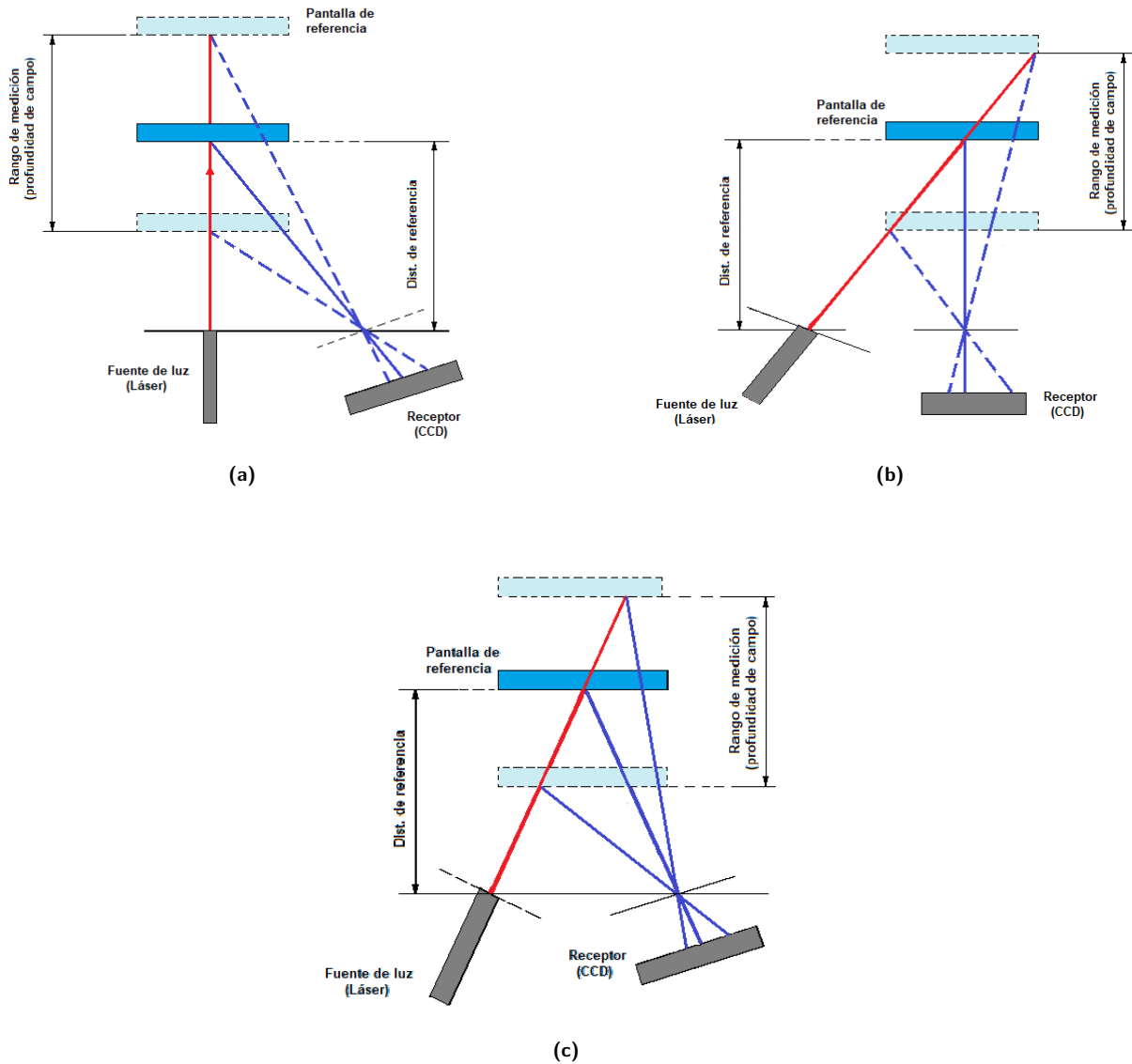


Figura 6. Representación gráfica de los tres arreglos utilizados para la caracterización y validación del sistema óptico. En a) se representa la fuente de luz láser perpendicular al objeto, en b), la cámara perpendicular al objeto y en c), ambos elementos en ángulo.

Estas configuraciones fueron seleccionadas para estudiar cómo la orientación de los componentes ópticos afectaba la resolución y precisión del sistema de escaneo. Cada disposición influye directamente en el ángulo de incidencia del haz láser sobre el objeto y, en cómo se captura y procesa la imagen por la cámara.

Para validar y comparar estas configuraciones, se diseñó un arreglo experimental, mostrado en la Figura 7, en el cual se utilizó un láser He-Ne como fuente de iluminación (elemento 1), un sistema formador de imágenes (elemento 2) y una platina de microdesplazamientos motorizada sobre la cual se colocó una pantalla de referencia (elemento 3). La pantalla sirvió como un plano de prueba sobre el cual proyectar

el haz láser y medir las variaciones en la captura de la cámara a diferentes distancias. La distancia de la pantalla respecto a los elementos ópticos (láser y cámara) se modificó en intervalos de 6.25 mm, cubriendo un rango total de 75 mm. Para cada punto dentro de este rango, se realizaron un total de 40 mediciones.

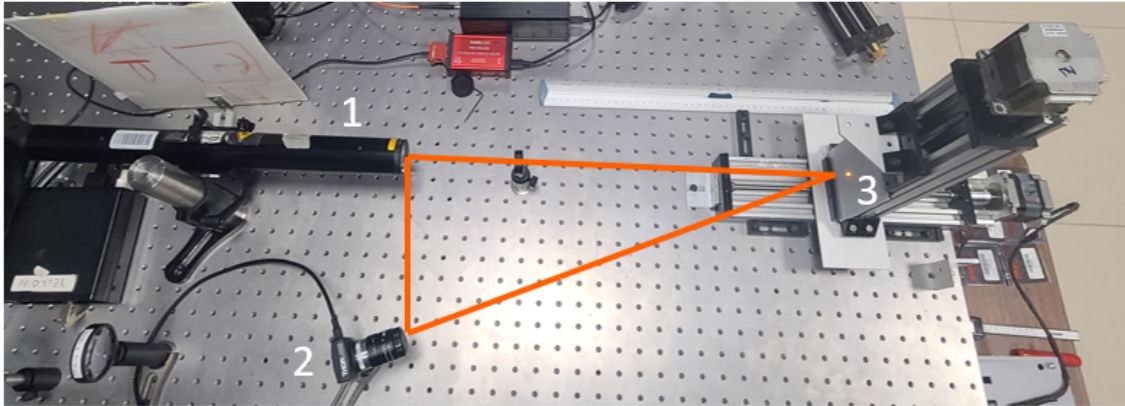


Figura 7. Arreglo experimental para la caracterización de la técnica de triangulación óptica. Los principales elementos son: 1- láser He-Ne, 2- sistema formador de imágenes (cámara con sistema de lentes) y 3- pantalla u objeto.

Este procedimiento se realizó para cada una de las configuraciones esquematizada en la Figura 7 y nos permitió caracterizar cómo el sistema capturaba y procesaba los datos en función de las variaciones geométricas. A medida que la pantalla se desplazaba hacia adelante y hacia atrás en estos intervalos controlados, se recopiló la información obtenida a través de la cámara, que registraba los cambios en la proyección del haz de luz sobre la superficie de la pantalla. Es decir, se registró la posición del punto de máxima intensidad en la imagen capturada por la cámara para cada posición de la pantalla de referencia.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8, los cuales permitieron calcular la resolución de cada una de las configuraciones planteadas. La resolución se definió como la capacidad del sistema para distinguir cambios en la posición de la superficie del objeto en función de las variaciones del ángulo y la captura de la luz reflejada. Este análisis permitió determinar cuál de las configuraciones ofrecía la mejor resolución en términos de precisión geométrica y dispersión de los datos alrededor de un valor central.

El análisis se centró en realizar un estudio estadístico sobre las posiciones de los máximos locales detectados en las imágenes. Para ello, se efectuó el cálculo de la posición promedio y la desviación estándar de dichas posiciones, con el objetivo de obtener una medida de tendencia central y dispersión, respectivamente, de las posiciones de los máximos.

El promedio de cada una de las posiciones de los máximos, denotados por y_i , está dado por la relación

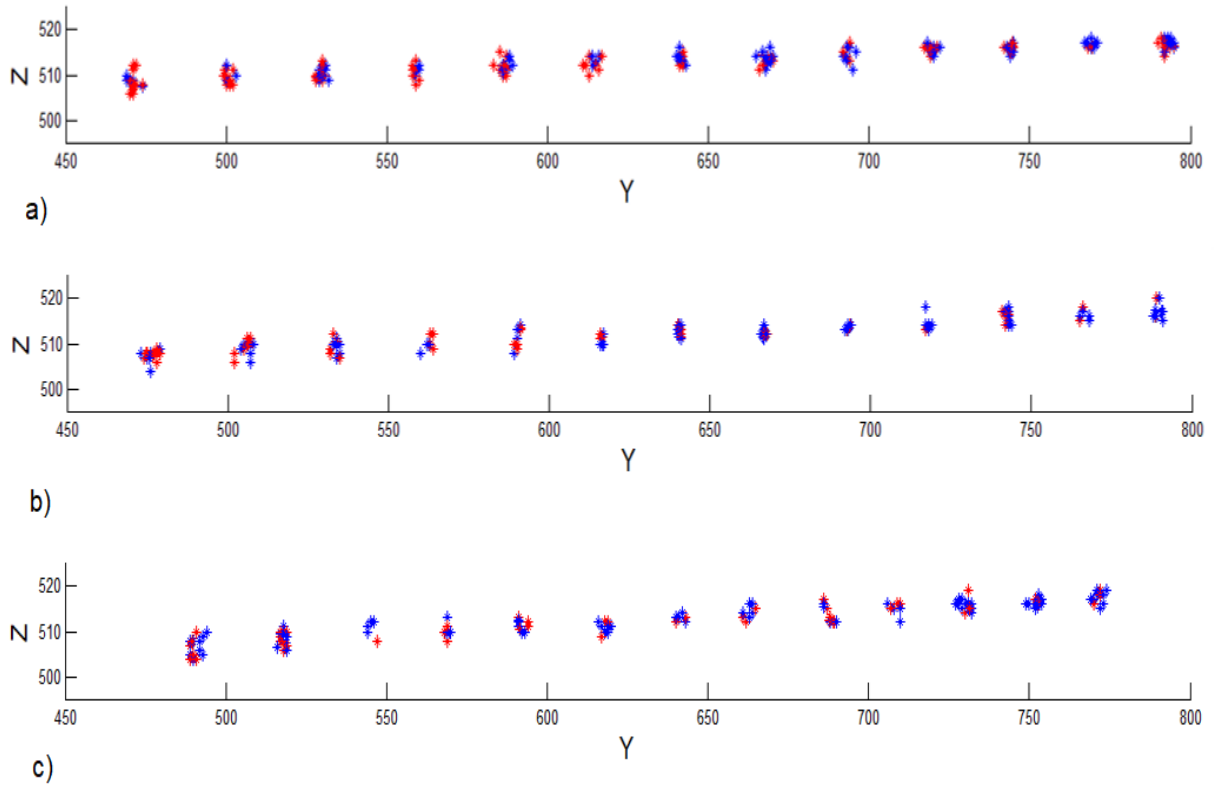


Figura 8. Representación gráfica de la proyección del spot en la pantalla de referencia. Cada punto representa la ubicación en píxeles de dicha proyección. En a) se representa la variante con la fuente de luz láser perpendicular al objeto, en b), con la cámara perpendicular al objeto y en c), ambos elementos en ángulo.

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (4)$$

donde $\bar{y}$ representa el promedio de las posiciones, N es el número de posiciones consideradas, y y_i son los valores individuales de las posiciones en la columna de la matriz de posiciones.

La desviación estándar, mide la dispersión de los datos respecto al promedio. Es decir, nos indica de qué tan alejadas están las posiciones individuales de los máximos en una imagen respecto a su valor promedio. La desviación estándar para una serie de posiciones y_i se calculó como:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}. \quad (5)$$

Aquí, σ_y representa la dispersión de las posiciones alrededor del promedio $\bar{y}$, proporcionando una idea de la variabilidad en la posición de los máximos en cada imagen. Una desviación estándar baja indicaría

que las posiciones están cercanas al promedio, mientras que una desviación estándar alta sugeriría una mayor dispersión o variabilidad en las posiciones.

Luego pasamos al cálculo de la diferencia entre los promedios de las posiciones de los máximos en imágenes consecutivas. Este paso permitió evaluar el cambio en la posición de los máximos a lo largo de la secuencia de imágenes. Para ello, se calculó la diferencia absoluta entre los promedios de las posiciones y de dos imágenes consecutivas:

$$\Delta P(k) = | \bar{y}(k+1) - \bar{y}(k) | . \quad (6)$$

Este valor, $\Delta P(k)$, representa la magnitud del cambio en la posición promedio de los máximos entre un número de imágenes (k) y $(k+1)$. Al ser una diferencia absoluta, se garantiza que el resultado sea positivo, reflejando únicamente la magnitud del cambio sin importar su dirección.

De manera similar, se calcula la diferencia en las desviaciones estándar de las posiciones entre las imágenes consecutivas, es decir, cuánto varía la dispersión de las posiciones de los máximos entre una imagen y la siguiente:

$$\Delta D(k) = | \sigma_y(k+1) - \sigma_y(k) | . \quad (7)$$

Este valor, $\Delta D(k)$, proporciona información sobre cómo cambia la dispersión o variabilidad de las posiciones entre las imágenes consecutivas. Una pequeña diferencia en la desviación estándar indicaría que la dispersión de los máximos es estable entre ambas imágenes, mientras que una diferencia grande sugiere un cambio en la variabilidad de las posiciones.

Posteriormente, se combina la información de la diferencia en las posiciones promedio y la diferencia en las desviaciones estándar, sumando ambos términos para obtener una medida global del cambio entre imágenes consecutivas:

$$\Delta D_{Max}(k) = \Delta P(k) + | \Delta D(k) | . \quad (8)$$

Este valor proporciona una medida compuesta del cambio total en los máximos locales entre imágenes.

Posteriormente se obtuvieron el promedio y la desviación estándar de las diferencias calculadas en los

pasos anteriores. Esto se hace para resumir de manera global el comportamiento de las posiciones y su variabilidad a lo largo de todas las imágenes de la secuencia. Para esto se calculó el promedio de las diferencias en las posiciones:

$$P_{def} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \Delta P(k) \quad (9)$$

Este valor proporciona una medida del cambio promedio en las posiciones de los máximos entre imágenes consecutivas, resumido en un solo número.

De manera análoga, se calculó el promedio de las diferencias en las desviaciones estándar:

$$D_{def} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \Delta D(k). \quad (10)$$

El siguiente paso se enfocó en calcular las distancias entre los máximos locales en imágenes consecutivas tanto en el eje z (la dirección vertical) como en el eje y (dirección horizontal). Este cálculo permite evaluar cómo se desplazan espacialmente los máximos locales a lo largo de las imágenes, lo cual puede ser indicativo de movimientos estructurales o cambios en la geometría de los máximos.

Matemáticamente, la distancia entre las posiciones de los máximos en el eje z entre dos imágenes consecutivas se definió como:

$$dist_z(k) = z(k+1) - z(k). \quad (11)$$

De manera análoga, la distancia en el eje y se calculó como:

$$dist_y(k) = y(k+1) - y(k). \quad (12)$$

Finalmente, se calculó la resolución del sistema, utilizando las diferencias promedio de las posiciones. La resolución del sistema óptico se definió como la relación entre la distancia física entre los puntos de medición y el cambio promedio en las posiciones y :

$$Resolucion_y = \frac{\Delta d}{\overline{\Delta y}}, \quad (13)$$

donde Δd es la distancia física conocida entre los puntos (6.25 mm en este caso) y $\overline{\Delta y}$ es el promedio de las diferencias en las posiciones y .

Luego, se calculó el error en la resolución, que está asociado a la dispersión de las posiciones de los máximos. Este error se obtuvo multiplicando la desviación estándar de las diferencias de posiciones por la resolución calculada, de la siguiente manera:

$$Error_y = D_{def} * Resolucion_y. \quad (14)$$

Este error refleja la incertidumbre en la resolución del sistema debido a la variabilidad en las posiciones de los máximos, proporcionando una idea de cuán precisas son las mediciones obtenidas.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la resolución óptica y error para cada una de las configuraciones propuestas para la técnica de triangulación. Como puede notarse, la configuración del láser perpendicular al objeto fue la que mejor resolución presentó (0.232 mm) pero con mayor error. La de menor error fue la configuración donde el láser y la cámara eran oblicuas a la pantalla de referencia, pero fue la de menor resolución.

Tabla 1. Resultados de la caracterización óptica de los 3 arreglos experimentales.

Arreglo experimental	Resolución óptica	Error
1. Fuente de luz láser perpendicular al objeto	0.232 mm	± 0.081 mm
2. Cámara perpendicular al objeto	0.266 mm	± 0.072 mm
3. Ambos elementos en ángulo	0.238 mm	± 0.075 mm

3.2. Sistema formador de imágenes

La cámara CMOS es responsable de capturar las imágenes de la línea de luz proyectada sobre la superficie del objeto. En este tipo de sistemas, la cámara se posiciona en un ángulo con respecto a la fuente de luz

láser, formando una configuración triangular. Este diseño es clave en la técnica de triangulación láser, donde la diferencia de ángulos entre el láser y la cámara permite determinar las coordenadas de cada punto de la superficie del objeto.

La lente seleccionada para la cámara está optimizada para trabajar en la región visible del espectro electromagnético, asegurando que la línea de luz del láser se enfoque adecuadamente en el sensor de la cámara. Esta lente ayuda a reducir aberraciones y distorsiones ópticas, lo que mejora la nitidez y precisión de las imágenes capturadas.

Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario asegurarse de que el detector, en este caso la cámara CMOS, esté correctamente calibrado y ajustado para obtener imágenes claras y precisas. Este proceso de calibración incluye tanto ajustes ópticos como parámetros de configuración a través del software que controla la cámara.

Como juego de lentes se empleó el sistema de lentes MVL25M23 Navitar acoplado directamente a la cámara. Este juego de lentes permite el ajuste de dos parámetros:

1. Distancia Focal: la distancia focal de la lente determina el campo de visión de la cámara. Para nuestro escáner, ajustar correctamente la distancia focal es crucial para garantizar que toda la superficie del objeto quede dentro del campo de visión de la cámara durante el escaneo como se ve en la Figura 9a. Un ajuste adecuado de la distancia focal ayuda a mantener la nitidez y a evitar la distorsión de la imagen, lo que es esencial para una correcta reconstrucción tridimensional.
2. Apertura Numérica (f-stop): la apertura numérica controla la cantidad de luz que llega al sensor CMOS. Un valor de apertura más pequeño (f-stop mayor) genera una mayor profundidad de campo, permitiendo que más áreas de la imagen queden enfocadas, pero a costa de dejar entrar menos luz. En un entorno de escaneo controlado, ajustar esta apertura es importante para equilibrar el enfoque con la luminosidad de la imagen. Si la apertura es muy grande (f-stop pequeño), partes de la imagen pueden quedar desenfocadas, lo que afectaría la calidad del escaneo.

Por otro lado con el software ThorCam que controla la cámara CMOS, permite realizar una serie de ajustes digitales (Figura 9b) que también influyen en la calidad de las imágenes capturadas:

- Tiempo de exposición: un tiempo de exposición más largo permite que más luz llegue al sensor, lo cual es útil en situaciones de baja iluminación, pero si es demasiado largo puede producir imágenes

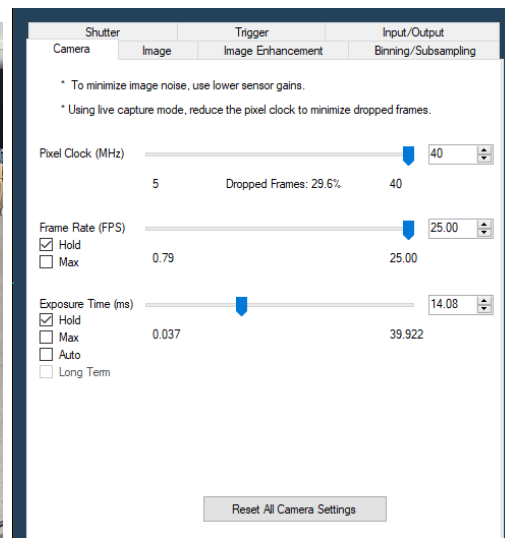
borrosas debido a cualquier pequeño movimiento de la cámara o el objeto. En nuestro caso, debido al control preciso del sistema mecatrónico, el tiempo de exposición debe optimizarse para capturar suficientes detalles sin producir saturación en la imagen.

- **Ganancia:** este ajuste controla la amplificación de la señal capturada por el sensor de la cámara. Una mayor ganancia puede ser útil en condiciones de poca luz, pero puede introducir ruido en la imagen, afectando la precisión de los datos capturados. Por lo tanto, la ganancia debe ajustarse cuidadosamente para evitar la pérdida de calidad en las imágenes.
- **Balance de blancos y contraste:** pueden influir en la claridad y el detalle de las texturas capturadas. Estos parámetros deben configurarse de manera que los colores proyectados por el láser y reflejados en el objeto se representen de manera coherente en las imágenes.

En resumen, el proceso de calibración de la cámara comienza ajustando el enfoque físico de la lente para que coincida con la distancia del objeto en el escáner. Posteriormente, se ajustan los parámetros en el software (exposición, ganancia, balance de blancos y contraste) para asegurarse de que las imágenes obtenidas tengan el contraste y el brillo adecuados para una correcta adquisición de datos. Una vez que los ajustes ópticos y digitales se han realizado, es fundamental realizar pruebas de captura para verificar que la calidad de las imágenes sea la esperada y que la geometría del objeto se capture con precisión. Este proceso asegura que el sistema esté listo para realizar una captura de imágenes lo más óptima posible, para luego obtener una reconstrucción tridimensional del objeto a escanear.



(a)



(b)

Figura 9. Captura de imágenes. En (a) el ajuste del enfoque de la cámara CMOS y en (b) el cuadro de diálogo del software de la cámara CMOS para el control de parámetros de exposición.

3.3. Estructuración de haces de luz

3.3.1. Caracterización espacial del haz láser

La fuente de luz empleada fue un láser de Helio-Neón (He-Ne) con una longitud de onda de 594.1 nm. Esta longitud de onda tiene ventajas en términos de penetración de luz y minimización de la dispersión en superficies irregulares, factores que son fundamentales para obtener mediciones precisas de la geometría del objeto. Los láseres HeNe son ampliamente utilizados en investigaciones por su estabilidad y baja divergencia, lo que permite obtener líneas de luz muy finas, adecuadas para el escaneo detallado.

Para garantizar que los elementos ópticos que modifican el frente de onda del haz láser no introduzcan limitaciones por difracción, es necesario medir el tamaño de la cintura del haz según los criterios establecidos en la norma ISO 11146. En este contexto, se debe asegurar que el diámetro del haz en la cintura sea siempre menor que el apertura clara de los elementos ópticos utilizados, evitando así efectos indeseados en la propagación del haz (Johnston & Sasnett, 2004).

El método de la navaja es una técnica ampliamente utilizada para la caracterización de la cintura del haz láser. Este método se basa en la interrupción parcial del haz láser mediante la hoja de una navaja de afeitar que se coloca perpendicularmente a la dirección de propagación del haz. Ésta se desplaza gradualmente a través del haz, mientras que un detector mide la intensidad de la luz que pasa sin ser bloqueada. Este proceso genera una curva de intensidad, que permite deducir el perfil transversal del haz láser.

Pasos del proceso:

1. Configuración del sistema:

- Colocamos el láser en posición fija para emitir el haz hacia el detector.
- La navaja se colocó en una platina de movimiento lineal, permitiendo que su posición varíe de manera controlada a lo largo del eje transversal del haz.

2. Movimiento de la navaja:

- La navaja se desplaza desde una posición en la que no bloquea el haz hasta una en la que lo interrumpe completamente.

- A cada posición de la navaja, se mide la intensidad de la luz que llega al fotodetector, la cual disminuye a medida que más parte del haz es bloqueada.
3. Registro de los Datos:
- La intensidad medida se registra en función de la posición de la navaja. El resultado es una curva de intensidad que muestra cómo disminuye la potencia del haz conforme la navaja lo bloquea progresivamente.

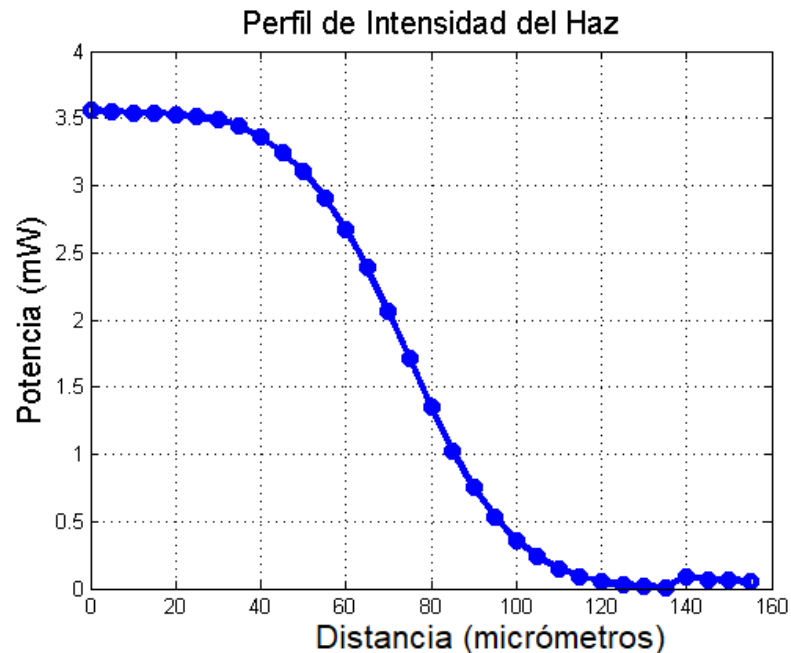


Figura 10. Intensidad del haz registrada por el detector en función de la posición de la navaja.

4. Análisis de los datos:
- A partir de la curva obtenida, se calcula el diámetro del haz en varios puntos de su trayectoria, incluyendo la cintura del haz (el punto donde el haz es más estrecho). Este análisis se realiza aplicando un ajuste gaussiano a los datos para determinar el radio del haz en función de la posición de la navaja.
5. Cálculo del radio del haz:
- Con la curva de intensidad en mano, se puede determinar el radio del haz en su punto más estrecho (w_0), lo que corresponde a la cintura del haz. A partir de este valor, se obtiene el perfil del haz a lo largo de su trayectoria de propagación como se representa en la Figura 10.

La cintura del haz obtenida fue de 0.69 mm, lo que está en línea con los valores teóricos esperados para un láser de estas características.

3.3.2. Caracterización de haces de luz estructurados

Para llevar a cabo el escaneo tridimensional, se estructuraron haces de luz con el propósito de obtener una representación detallada de la superficie objetivo. En este caso, la técnica empleada se basa en la generación de una línea de luz continua. Dicha línea de luz fue generada mediante tres dispositivos ópticos refractivos: lente cilíndrica plano convexa ($f = 6.4mm$), lente cilíndrica periódica ($f = 16mm$) y lente de Powell ($\alpha = 45^\circ$). Cada uno de estos elementos ópticos tiene propiedades únicas que modulan la amplitud y fase del frente de onda de luz láser, afectando tanto la intensidad como la distribución de la luz proyectada, como se puede observar en la Figura 11.

Para comprender el desempeño de cada uno de estos dispositivos ópticos, se realizó un análisis de la varianza en la intensidad de la línea de luz generada. Este análisis permitió seleccionar el elemento óptico que generara una línea de luz lo más fina y uniforme posible, sin comprometer la intensidad necesaria para una buena captación en el proceso de escaneo. Además, se tomó en cuenta la profundidad de campo de cada dispositivo, dado que esta propiedad afecta la capacidad de enfoque.

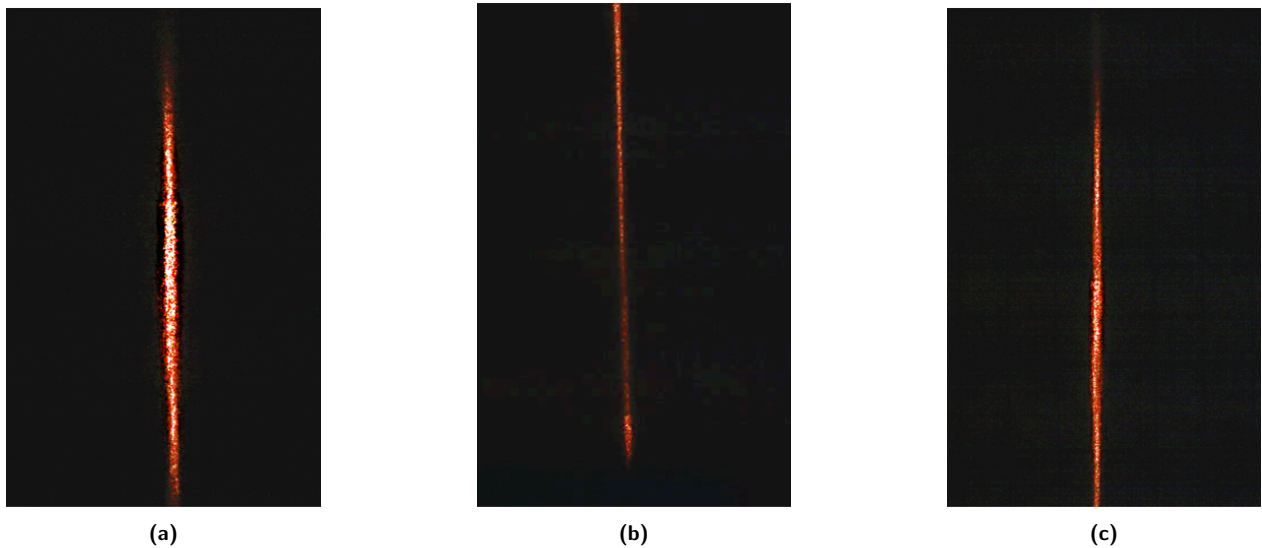


Figura 11. Imágenes obtenidas con la cámara CMOS de la estructuración de los haces de luz utilizando los tres elementos ópticos. En el a) se obtuvo la línea de luz por medio de la lente cilíndrica, en b) por la lente cilíndrica periódica, y en c) por la lente Powell.

Para evaluar adecuadamente la calidad de las líneas de luz generadas, se capturaron imágenes con cada

uno de los elementos ópticos seleccionados. Posteriormente, dichas imágenes fueron sometidas a un procesamiento digital utilizando herramientas en MATLAB, lo que permitió extraer y analizar los perfiles de intensidad de las líneas de luz.

En este análisis de procesamiento de las imágenes, se buscó obtener la varianza de los píxeles más intensos con respecto a una línea vertical que mejor se ajustara a su distribución espacial en la imagen. Este procedimiento permitió analizar la dispersión de dichos píxeles alrededor de una referencia óptima en el eje horizontal. A continuación, se presenta el detalle del proceso implementado.

El primer paso fue la normalización de la imagen convirtiendo los valores de intensidad en un rango de 0 a 1. Se dividió cada valor de píxel por la intensidad máxima de la imagen original. Esto permite que los valores de la imagen sean independientes de la iluminación absoluta. Matemáticamente, la normalización se expresó como:

$$I_{norm}(i, j) = \frac{I_{(i,j)}}{I_{max}}, \quad (15)$$

donde $I_{(i,j)}$ es el valor de intensidad del píxel en la posición (i, j) e I_{max} es la intensidad del píxel de mayor intensidad de toda la imagen.

En este paso, se aplica un umbral $U = 0.9$ a la imagen normalizada. Esto significa que solo se seleccionarán los píxeles cuya intensidad es mayor al 90 % de la máxima intensidad de la imagen, es decir,

$$I_{sel} = I_{norm}(i, j) > U. \quad (16)$$

Este filtro ayuda a eliminar el ruido de baja intensidad y permite seleccionar los elementos que se destacan en la imagen.

Con el conjunto de píxeles de alta intensidad seleccionados, se busca una línea de referencia vertical que minimice la dispersión horizontal de dichos puntos. Una línea vertical es adecuada en este contexto, ya que el sistema a desarrollar tiene simetría de rotación en el eje vertical. Para este ajuste, se utiliza el valor medio de las coordenadas horizontales, de los píxeles seleccionados:

$$x_{line} = \frac{1}{I_{sel}} \sum_{i=1}^{I_{sel}} x_i, \quad (17)$$

donde I_{norm} es el número total de píxeles seleccionados y x_i es la coordenada horizontal del pixel más intenso en cada renglón de la imagen. Esta línea se define en la imagen como una línea vertical ubicada en la posición x_{line} , siendo el mejor estimador de la alineación promedio de los píxeles seleccionados.

La dispersión de los píxeles más intensos en torno a la línea de ajuste se mide mediante la varianza de sus distancias horizontales. La distancia de cada píxel i con coordenada (x_i, y_i) a la línea de ajuste es simplemente la diferencia:

$$d_i = |x_i - x_{line}|. \quad (18)$$

A partir de estas distancias, se calcula la varianza de las distancias como:

$$\sigma^2(d) = \frac{1}{I_{sel}} \sum_{i=1}^{I_{sel}} (d_i - \bar{d})^2, \quad (19)$$

donde $\bar{d}$ es la media de las distancias de todos los píxeles seleccionados a la línea de ajuste.

Tabla 2. Resultados de la varianza (nominal y en unidades enteras) e intensidad de las líneas de luz lograda con los diferentes elementos ópticos.

Elemento óptico	Varianza Nominal [px]	Varianza Real[px]	Intensidad Máxima [bit]
Lente cilíndrica	2.1057	3	173
Lente cilíndrica periódica	0.9167	1	34
Lente powell	1.7872	2	64

La varianza representa la dispersión de los valores de intensidad, donde un valor menor indica una mayor uniformidad en la generación de la línea de luz.

La lente cilíndrica presenta el mayor valor de intensidad máxima (173 bit), sin embargo, también exhibe una elevada varianza (2.1057 px), lo cual sugiere una ensanchamiento en la línea de luz proyectada.

Por otro lado, la lente cilíndrica periódica muestra una varianza mínima (0.9167 px), lo que implica una mejor distribución de la luz. Sin embargo, su intensidad máxima (34 bit) es considerablemente baja, lo cual puede resultar en una línea de luz insuficientemente visible o de baja intensidad para ciertos sistemas ópticos. Además, esta lente tiene una profundidad de campo limitada, lo que podría restringir su rendimiento en aplicaciones con variaciones de distancia.

La lente Powell logra un balance adecuado entre intensidad (64 bit) y varianza (2 px en unidades enteras) en la línea generada. La varianza moderada permite mantener una distribución relativamente uniforme de intensidad en comparación con la lente cilíndrica, mientras que su valor de intensidad es significativamente mayor que el de la lente cilíndrica periódica, permitiendo reflejar una mayor cantidad de luz.

En función de estos argumentos, se seleccionó la lente Powell como el elemento óptico a utilizar en nuestro arreglo y generar una línea de luz delgada y suficientemente intensa. Por otra parte, la profundidad de campo que ofrece es la más grande de las tres lentes analizadas.

Para interpretar los resultados visualmente, en la Figura 12, se presentan las imágenes analizadas en escala de color según la intensidad, con la línea de ajuste superpuesta, permitiendo observar cómo los píxeles más intensos se distribuyen en torno a la misma. La visualización confirma la adecuación de la línea de ajuste y facilita la interpretación de la varianza de los píxeles más intensos en las imágenes.

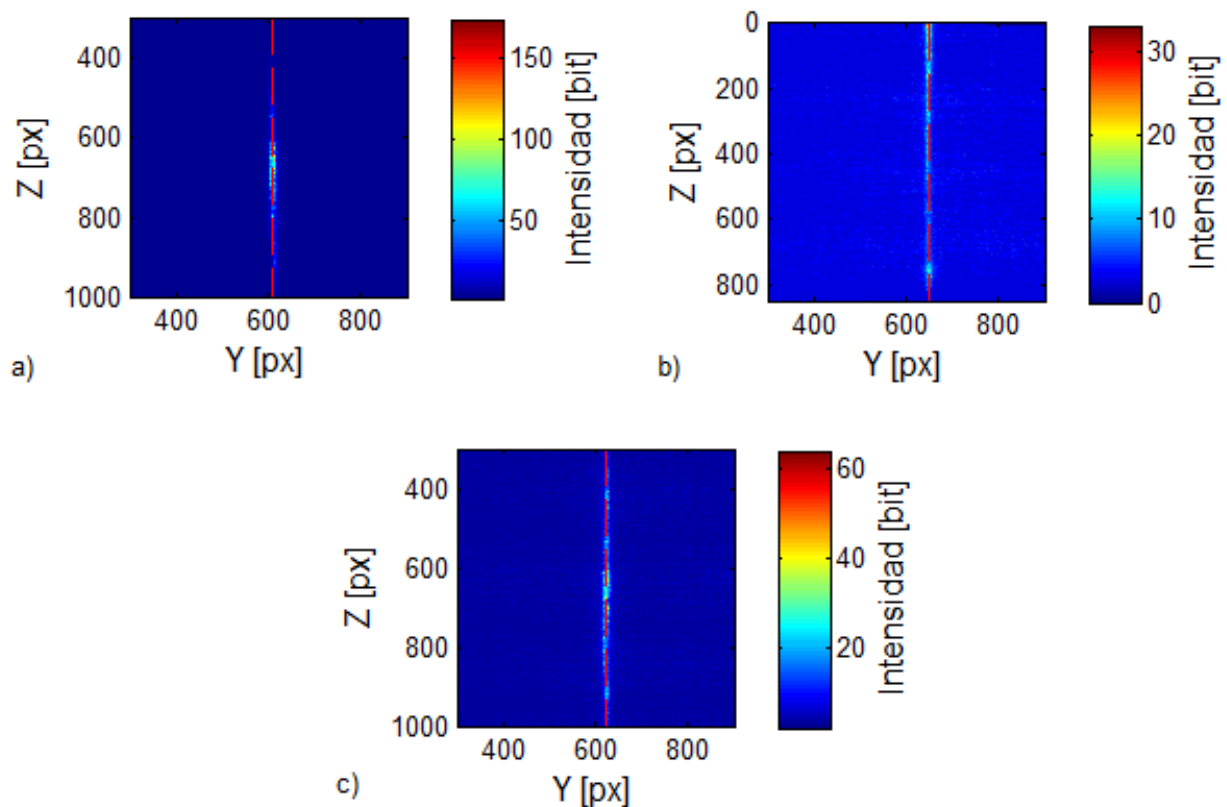


Figura 12. Varianza de la línea de luz generada por los elementos ópticos analizados. En (a) se representa la línea de luz obtenida por la lente cilíndrica y en contraste con la línea vertical que mejor se ajusta. De igual manera en (b) corresponde a la lente cilíndrica periódica y en (c) a la lente Powell.

3.4. Sistema mecatrónico

El sistema mecatrónico para el control y movimiento de la plataforma del escáner 3D, implica la integración de componentes electrónicos y mecánicos para garantizar la precisión y eficiencia en el proceso de escaneo. Este sistema, está basado en una arquitectura modular que incluye una placa Arduino Uno, una shield CNC, un motor a pasos y su driver. Estos elementos permiten controlar la rotación de la platina sobre la cual se situarán los objetos a escanear. A continuación se describe el funcionamiento y diseño del sistema.

3.4.1. Descripción del sistema

El Arduino Uno es la unidad de control central del sistema, utilizado debido a su flexibilidad e instrucciones reducidas de programación en sistemas de automatización. Este microcontrolador es capaz de recibir señales de un software de escaneo y ejecutar comandos de control para manejar el movimiento del motor a pasos, generando desplazamientos repetibles de la plataforma sobre la que se sitúa el objeto a escanear.

La shield CNC se utiliza como interfaz entre la placa Arduino y los componentes de control de movimiento. Ésta permite la conexión de múltiples motores a pasos, lo que facilita el control de varios ejes en la plataforma. Estudios sobre el uso de shields CNC han demostrado que son eficientes para proporcionar un control simultáneo y coordinado de los motores a pasos.

El driver de motor a pasos A4988, es responsable de suministrar la corriente necesaria y regular la secuencia de impulsos eléctricos que el motor a pasos necesita para rotar. El uso de drivers de este tipo ha sido ampliamente documentado en sistemas de escaneo por su capacidad para manejar cargas variables y obtener movimientos suaves, especialmente en aplicaciones que requieren alta resolución.

El motor a pasos es el componente encargado del movimiento de la plataforma. Gracias a su capacidad para realizar movimientos controlados en incrementos secuenciales, son ideales para plataformas de escaneo 3D. En este trabajo utilizamos el motor NEMA 17H3401S, el cual específicamente, tiene un paso de 1.8° por pulso, lo que significa que se requieren 200 pasos para completar una rotación completa. Esta característica, junto con su par adecuado para cargas moderadas, lo hace adecuado para nuestros requerimientos.

3.4.2. Control con Arduino/ (validación)

El control con Arduino en el sistema mecatrónico desarrollado para nuestro escáner 3D es uno de los elementos necesarios para la automatización del movimiento de la plataforma, lo que permite realizar escaneos más precisos a los realizados manualmente. La placa Arduino Uno es el núcleo de control del sistema, actuando como intermediario entre el software de escaneo y los actuadores mecánicos, en este caso, el motor a pasos.

El sistema está compuesto por la placa Arduino Uno, una shield CNC y un driver para motor a pasos. La placa Arduino es programada para enviar señales al driver, el cual se encarga de controlar la corriente que se suministra al motor a pasos, permitiendo el control del ángulo de rotación de la plataforma sobre la que se coloca el objeto a escanear. Para la gestión del control del motor y su implementación técnica, se diseñó un código el cual lo podemos encontrar en Anexo A.

En la Figura 13 se representa el diagrama de flujo del programa diseñado para el movimiento del motor a pasos. Esta comienza con la inicialización de puertos, donde en la función "setup", se configuran los pines del Arduino que controlan las señales de dirección, paso y habilitación del driver del motor a pasos.

Luego la función "loop" es responsable de gestionar el movimiento continuo del motor en ambas direcciones de rotación. El ciclo comienza con un retraso inicial para permitir la estabilización del sistema antes de que comience el movimiento. Posteriormente, se habilita el driver y se establece la dirección del giro con el pin 7.

El código ejecuta un ciclo "for" que realiza 200 pasos de movimiento, con un segundo ciclo anidado que ejecuta un pulso por cada paso. Los pulsos se envían al pin 4 para avanzar el motor, y cada pulso tiene un retardo de 10 ms, lo que controla la velocidad del motor.

Después de completar el movimiento en una dirección, el motor se detiene deshabilitando el driver y se espera un tiempo adicional antes de invertir la dirección de rotación. Luego, el proceso se repite en la dirección opuesta, permitiendo que el sistema se regrese a su origen para reducir errores de posicionamiento (backlash).

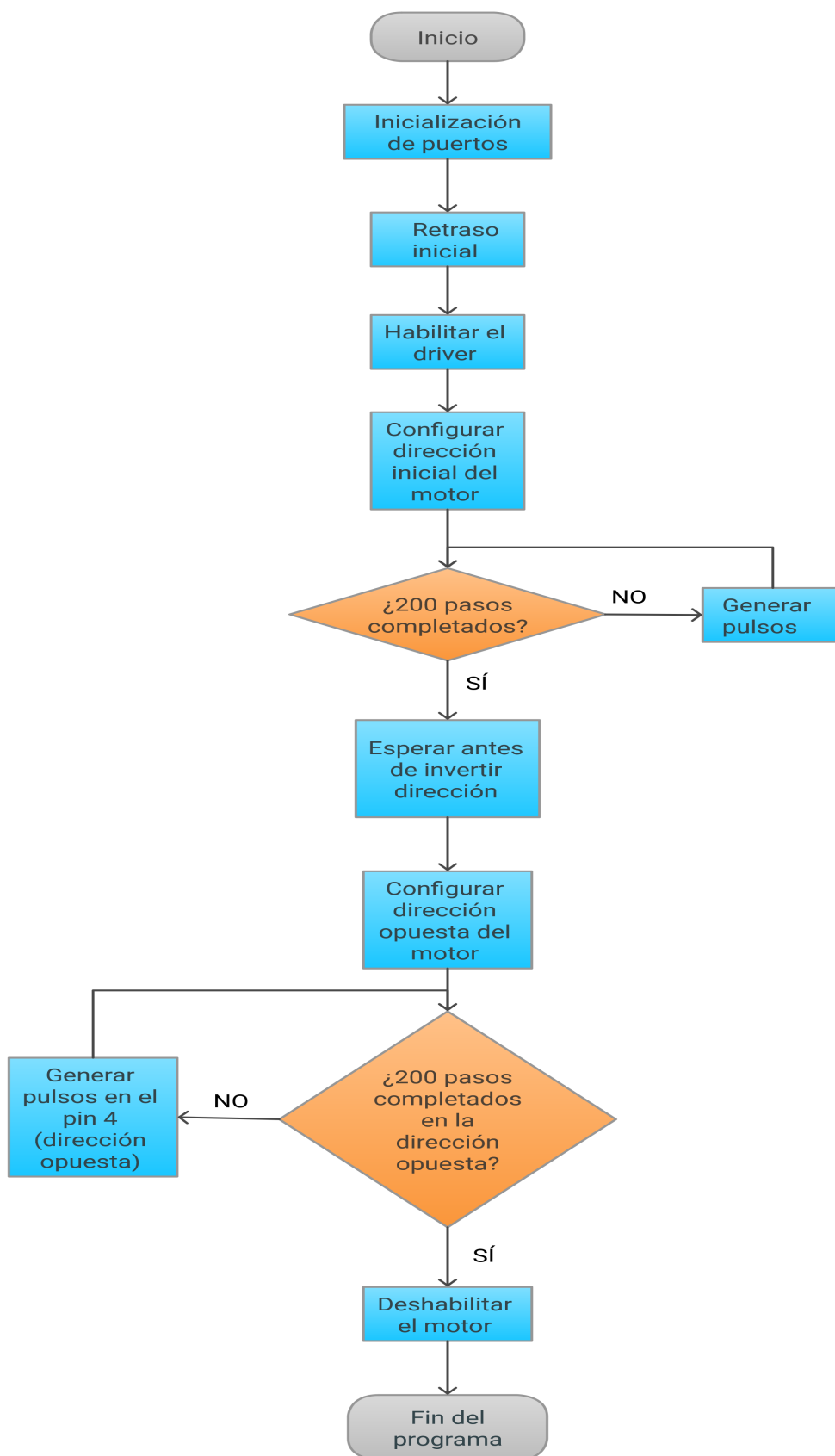


Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de control del motor a pasos. Tras un retraso inicial para estabilizar el sistema, el driver se habilita y el motor realiza 200 pasos en una dirección, generando pulsos en el pin correspondiente. Posteriormente, se espera un tiempo, y el motor invierte su dirección para repetir el proceso en sentido opuesto. El motor se desactiva y el programa termina.

Luego el motor se desactiva una vez completado el ciclo mediante la función "exit", para evitar movimientos adicionales.

A través de un código implementado en Arduino, se gestionó la operación del motor a pasos, lo que permitió movimientos controlados, necesarios para la captura de datos tridimensionales. Este sistema proporciona las bases para la integración de los componentes de control y movimiento.

3.4.3. Diseño de carcasas (impresión 3D)

Con el sistema electrónico correctamente configurado, nos enfocamos en la estructura física que le dará soporte a dicho sistema. En esta sección, se aborda el diseño y fabricación de una estructura que permita la rotación de los objetos a escanear y el soporte de los componentes electrónicos, como el Arduino, el driver del motor y el propio motor a pasos.

El proceso de diseño se llevó a cabo mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), y la fabricación se realizó utilizando impresión 3D, buscando que la estructura fuera robusta, funcional y adecuada para el propósito de integrar el sistema de escaneo 3D. Para ello se siguieron los siguientes pasos.

1. Definición de Requisitos Funcionales.

El primer paso en el proceso de diseño es establecer los requisitos funcionales que debe cumplir el mismo. En este caso, serían dos funciones principales:

- Rotación del objeto: debe alojar un sistema mecánico que permita la rotación del objeto a escanear, impulsado por el motor a pasos.
- Integración de componentes electrónicos: la estructura debe contener de manera eficiente el Arduino Uno, el driver de motor y el propio motor a pasos, permitiendo conexiones eléctricas seguras y accesibles para mantenimiento.

2. Diseño en Software CAD.

Una vez establecidos los requisitos, el diseño de las estructuras se desarrolló en un software CAD (ver Anexo C y D). Para el diseño se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dimensiones del motor y componentes electrónicos: el modelo del motor NEMA 17H3401S tiene dimensiones específicas que deben ser incorporadas con precisión en el diseño para que ensamble correctamente. Lo mismo aplica para el Arduino Uno y el driver del motor.
- Sistemas de montaje: se diseñan orificios y anclajes en la carcasa para asegurar los componentes electrónicos y el motor. Esto asegura que la plataforma se mueva sin vibraciones o desajustes durante el escaneo.
- Rotación del objeto: la estructura debe incluir una base giratoria (ver Figura 14a), que en este caso consiste en una plataforma circular montada directamente sobre el eje del motor a pasos. Este mecanismo permite una rotación suave y controlada.

El diseño en CAD se optimiza para minimizar el uso de material sin comprometer la rigidez estructural, ya que la impresión 3D puede tener limitaciones en cuanto a resistencia mecánica, dependiendo del tipo de material utilizado (Cojocarú et al., 2022). Por otro lado, para reducir el tiempo de impresión y facilitar el ensamble, en el diseño se optó por seccionar en dos partes la estructura que soporta los componentes electrónicos como se muestra en las Figuras 14b y 14c.

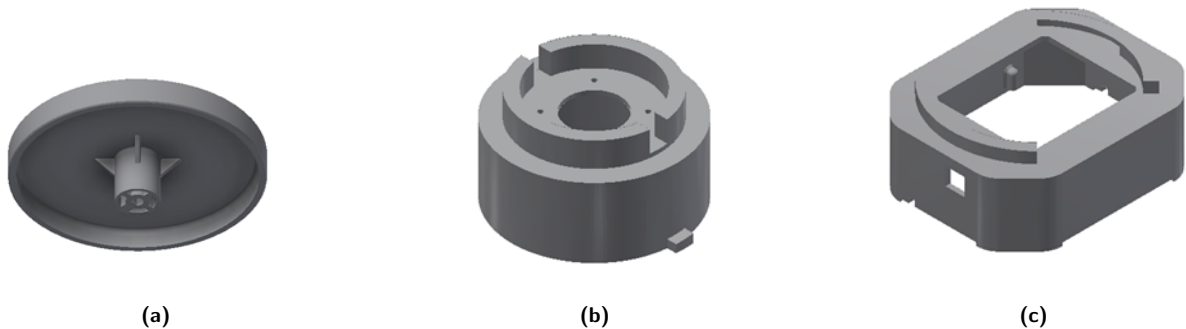


Figura 14. Diseño de la estructura de soporte del sistema mecatrónico. En (a) la plataforma giratoria donde se colocarían los objetos a escanear. En (b) la estructura de la parte superior la cual en su interior se colocó el motor a pasos. En (c) la estructura de la parte inferior la cual le soporta a todo el sistema.

3. Prototipado y fabricación por impresión 3D

Una vez que el diseño CAD está finalizado, se exporta en formato STL para ser procesado en el software de impresión 3D. Para este proyecto, se opta por PLA (ácido poliláctico) como material de impresión debido a su facilidad de uso, costo accesible y resistencia adecuada para aplicaciones de soporte mecánico (Melenka et al., 2016). El proceso de impresión 3D se realiza utilizando una impresora de modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés), lo que permite fabricar las estructuras capa por capa.

Durante el proceso de fabricación, es crucial realizar pruebas preliminares de ajuste para asegurarse

de que los componentes electrónicos y el motor a pasos encajan perfectamente en la estructura impresa. También se verifica que la plataforma rotatoria se mueva de manera fluida y que no existan fricciones excesivas que puedan comprometer la precisión del escaneo.

4. Montaje e integración

Una vez que las estructuras y plataforma están fabricadas, se procede al montaje de todos los componentes. Como se muestra en la Figura 15a, el motor NEMA 17H3401S se fija en su lugar dentro de la parte superior, asegurando que el eje del motor esté alineado correctamente con la plataforma giratoria. El Arduino Uno y el driver de motor se instalan en compartimentos diseñados específicamente en la parte inferior, mostrándose en la Figura 15b.

Por ultimo, una vez conectados los cables entre el driver y el motor a pasos, se ensamblan ambas partes de la estructura. En la Figura 15c se puede ver el sistema mecatrónico totalmente armado.

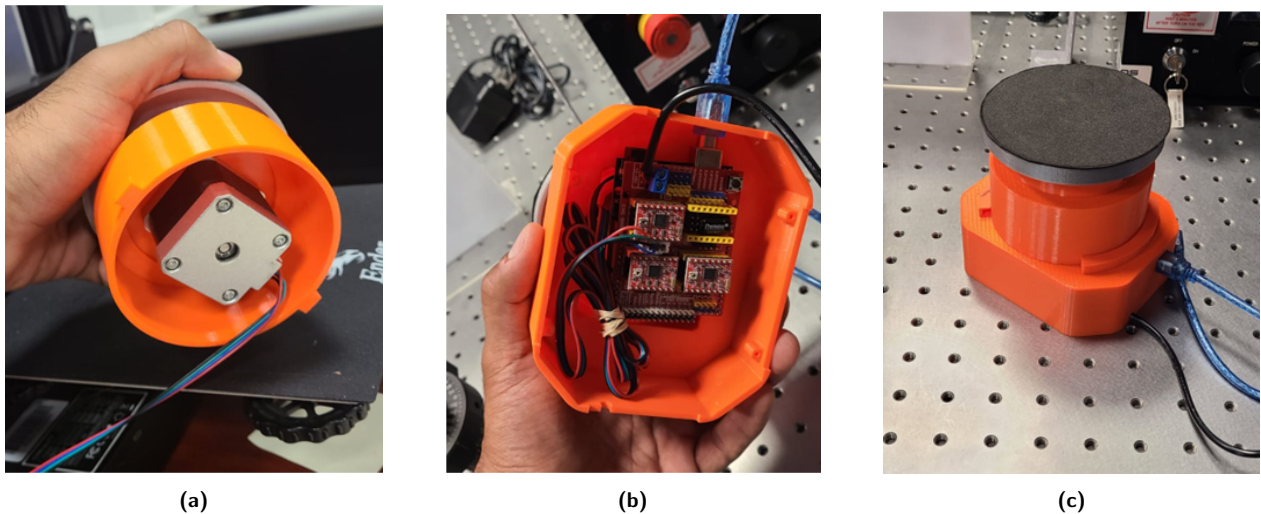


Figura 15. Sistema mecatrónico en su etapa de armado. (a) parte superior y plataforma con motor a pasos, (b) parte inferior con placa Arduino y driver de motor, (c) estructura ensamblada con la electrónica integrada

5. Validación del diseño

Finalmente, se realizaron pruebas para verificar funcionamiento del sistema. Estas pruebas incluyeron la rotación del objeto en la plataforma mediante la activación del motor a pasos, controlado por el código de Arduino previamente descrito en la Sección 3.4.2, verificando que la alineación de las piezas estuviera bien centrada para que la rotación de la platina fuera uniforme y estable.

El uso de herramientas CAD y la impresión 3D permitieron nos permitió obtener una estructura sólida y funcional que cumple con los requisitos del sistema de escaneo 3D. Este proceso ha sido demostrado en trabajos anteriores de fabricación digital y sistemas mecatrónicos (Hunde & Woldeyohannes, 2022).

3.5. Generación de nube de puntos

El sistema de reconstrucción digital es la etapa final del proceso de escaneo 3D, el cual transforma la información óptica y mecánica capturada en un modelo tridimensional digital. Este proceso implica varios pasos, comenzando con la captura de imágenes mediante el sistema óptico descrito en la Sección 2.2.

Las imágenes capturadas se procesan para generar una matriz de puntos, o conjunto de datos seleccionados, que posteriormente son convertidos a otro sistema de coordenadas. Esta transformación facilita la adaptación de los datos al formato de escaneo, permitiendo transformar los puntos bidimensionales capturados en coordenadas espaciales tridimensionales. En esta sección, se detallan los pasos específicos de la reconstrucción digital realizados en nuestro sistema de escaneo, los cuales fueron llevados a cabo utilizando el software MATLAB.

3.5.1. Lectura y selección de datos

Adquisición de imágenes

La cámara CMOS se encarga de capturar imágenes en cada posición del objeto. El sistema mecatrónico controla el movimiento rotacional de la plataforma donde se coloca el objeto a escanear. El motor a pasos genera una rotación de 1.8° por cada paso. Este movimiento es gestionado mediante el código de Arduino, descrito en la Sección 3.4.2, que controla los parámetros de paso y dirección.

Durante el proceso de escaneo, el sistema ejecuta un ciclo de 200 pasos, cubriendo una rotación completa de 360° del objeto. En cada paso, la cámara captura una imagen de la línea de luz proyectada sobre el objeto. Estas imágenes contienen la información sobre el perfil tridimensional del objeto en esa posición particular. Al finalizar la rotación completa, se habrá capturado una imagen por cada posición angular, haciendo un total de 200 imágenes.

Para gestionar la adquisición de imágenes de la cámara, se utilizó la interfaz de software ThorCam, la cual permite configurar los parámetros de la cámara, como la exposición y la ganancia (descrito en la Sección 3.2), asegurando así la calidad óptima de cada captura. La integración de ThorCam en el proceso de escaneo automatizado permitió acoplar la captura de imágenes con el movimiento rotacional de la plataforma, de manera que, en cada paso de 1.8° del motor, la cámara captura una imagen de forma

sincronizada con el giro del objeto.

Esta automatización permitió optimizar el flujo de trabajo y minimizar la intervención manual. La configuración lograda entre ThorCam y el sistema de control del motor proporciona un escaneo continuo y eficiente, asegurando que cada captura esté correctamente alineada con la posición angular correspondiente del objeto.

Este conjunto de imágenes se utilizará posteriormente en el proceso de reconstrucción digital, donde se transformarán en una nube de puntos que describe la superficie del objeto de manera tridimensional.

Selección de datos

Después de la captura de imágenes por la cámara en nuestro sistema de escaneo 3D, se realiza un proceso de selección de datos para asegurar que solo se utilicen los puntos relevantes para la reconstrucción digital. Este proceso se implementa mediante el uso de software Matlab, donde un código diseñado específicamente permite filtrar los puntos de interés y eliminar el ruido o datos irrelevantes. Este código se puede ver en el Anexo B.

La cámara captura imágenes que contienen la proyección de la línea de luz sobre la superficie del objeto. Sin embargo, no todos los puntos en la imagen son útiles para la reconstrucción, ya que el sistema también puede captar reflexiones, sombras o zonas sin información relevante. Para resolver esto, se implementa un algoritmo de selección de datos que realiza los siguientes pasos:

1. En cada imagen, se examina cada renglón para encontrar los valores de intensidad máxima ($\max(v)$), que deben ser superiores a un umbral de intensidad de 35 bits para este caso. Este umbral permite filtrar ruidos y garantizar que solo se capturen los puntos más brillantes.
2. Se seleccionan los puntos específicos que corresponden a la intersección de la línea de luz con la superficie del objeto. Estas coordenadas en la imagen representan las posiciones y y z en el sistema de coordenadas cartesianas.
3. Si el criterio de intensidad se cumple, se calcula la posición horizontal promedio ($pos(k)$) de los píxeles con máxima intensidad y se determina su distancia absoluta al centro ($d(k)$). Esta distancia permite calcular el radio del objeto ($r(k)$), el cual representa la coordenada radial del punto de interés en función de su distancia desde el centro de la imagen.
4. Las coordenadas extraídas se almacenan en una matriz para ser procesadas y transformadas en coordenadas cilíndricas durante la reconstrucción.

3.5.2. Nube de puntos

Conversión a coordenadas cilíndricas

Luego de la captura de imágenes por parte de la cámara CMOS y pasado por el proceso de selección de datos, obtenemos las coordenadas cartesianas (y, z) de los puntos sobre la línea de luz:

- y : corresponde a la posición horizontal del punto en la imagen capturada por la cámara.
- z : es la altura del punto sobre la superficie del objeto.

El sistema de coordenadas cilíndricas es particularmente adecuado para objetos que se mueven en torno a un eje de rotación, como en el caso de nuestra plataforma de escaneo. Este sistema es una representación tridimensional alternativa a las coordenadas cartesianas. En lugar de describir un punto en el espacio mediante las coordenadas cartesianas (x, y, z) , el sistema de coordenadas cilíndricas utiliza tres parámetros: el radio (r), el ángulo (θ), y la altura (z).

En nuestro sistema de escaneo, estos parámetros se definen de la siguiente manera:

- r (radio): es la distancia desde un punto específico en la superficie del objeto hasta el eje de rotación. Esta distancia se calcula en función de la proyección de la línea láser sobre el objeto, que es capturada por la cámara. La distancia del punto al eje de rotación se puede determinar utilizando técnicas geométricas y trigonométricas, considerando la distancia entre la cámara y el objeto, y la posición del punto en la imagen.
- θ (ángulo de rotación): este valor está directamente relacionado con el movimiento angular de la plataforma controlada por el sistema mecatrónico. En nuestro caso, la plataforma gira en pasos de 1.8° . Después de cada rotación, la cámara captura una nueva imagen de la superficie del objeto.
- z (altura): esta coordenada representa la posición vertical del punto en relación con la base del objeto y se obtiene directamente de la imagen capturada por la cámara.

Para obtener las coordenadas cilíndricas completas (r, θ, z) , seguimos los siguientes pasos:

Cálculo del radio (r): en este sistema, el radio se obtiene directamente a partir de la ordenada y . Este valor representa la distancia radial desde el eje de rotación hasta el punto medido en la superficie del objeto.

Asignación del ángulo (θ): como el objeto rota en incrementos de 1.8° por cada captura de imagen, el valor de θ se conoce y se asigna a cada punto obtenido en cada imagen. Para cada imagen, el ángulo se incrementa en 1.8° , generando una secuencia de puntos que rodean completamente el objeto a lo largo de 200 pasos.

Conversión a coordenadas cartesianas: después de obtener las coordenadas cilíndricas (r, θ, z) , transformamos las coordenadas radiales en el plano (r, θ) a coordenadas cartesianas (x, y, z) . Esta conversión se realiza utilizando las siguientes ecuaciones de transformación:

$$x(k) = r(k) * \cos(\theta(k)), \quad (20)$$

$$y(k) = r(k) * \sin(\theta(k)). \quad (21)$$

Aquí, el valor de r corresponde a la coordenada y original de la imagen, y θ es el ángulo calculado para el paso de rotación correspondiente. Esta conversión permite que cada punto de la superficie del objeto, capturado en diferentes posiciones angulares, sea representado en un sistema de coordenadas tridimensional cartesianas (x, y, z) .

Con la transformación completa de las coordenadas, es posible graficar todos los puntos en un espacio tridimensional. La combinación de todos los puntos capturados en cada uno de los 200 pasos de rotación permite generar una nube de puntos.

Almacenamiento de datos

La etapa final consiste en la generación de una nube de puntos tridimensionales a partir de las coordenadas calculadas. Estos puntos se almacenan en la matriz M , en la que cada fila representa un punto en el espacio tridimensional con sus coordenadas x , y y z . Esta matriz final permite visualizar la forma del objeto representado en las imágenes procesadas y facilita el análisis tridimensional de la distribución espacial de los puntos de máxima intensidad.

La matriz final M se define como:

$$M = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}, \quad (22)$$

donde cada fila corresponde a un punto en el espacio tridimensional. Esta matriz permite la visualización y el análisis de la nube de puntos en aplicaciones de reconstrucción y modelado tridimensional.

Representación gráfica de nube de puntos

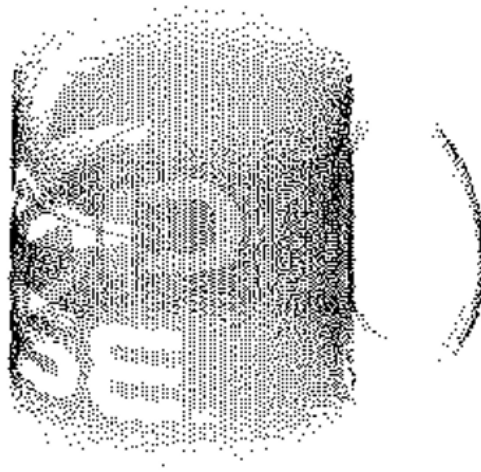


Figura 16. Representación gráfica de nube de puntos

3.6. Sistema de escaneo tridimensional mediante haces de luz estructurados

Finalmente, el primer resultado de nuestro trabajo fue el desarrollo de un sistema de escaneo tridimensional (Figura 17). Este emplea la técnica de triangulación láser para la medición y captura de las imágenes de los objetos. Se compone de un láser de Helio-Neón (HeNe) con longitud de onda de 594.1 nm, una cámara CMOS como receptor principal, un sistema de lentes para mejorar el enfoque y una lente de Powell que transforma el haz de luz del láser en una línea de luz continua. Esta configuración permite generar un patrón estructurado que facilita la captura de la superficie del objeto. Tras evaluar distintas opciones, se seleccionó la configuración de arreglo número 2, en la cual el láser y la cámara

están posicionados en ángulo con respecto al objeto.

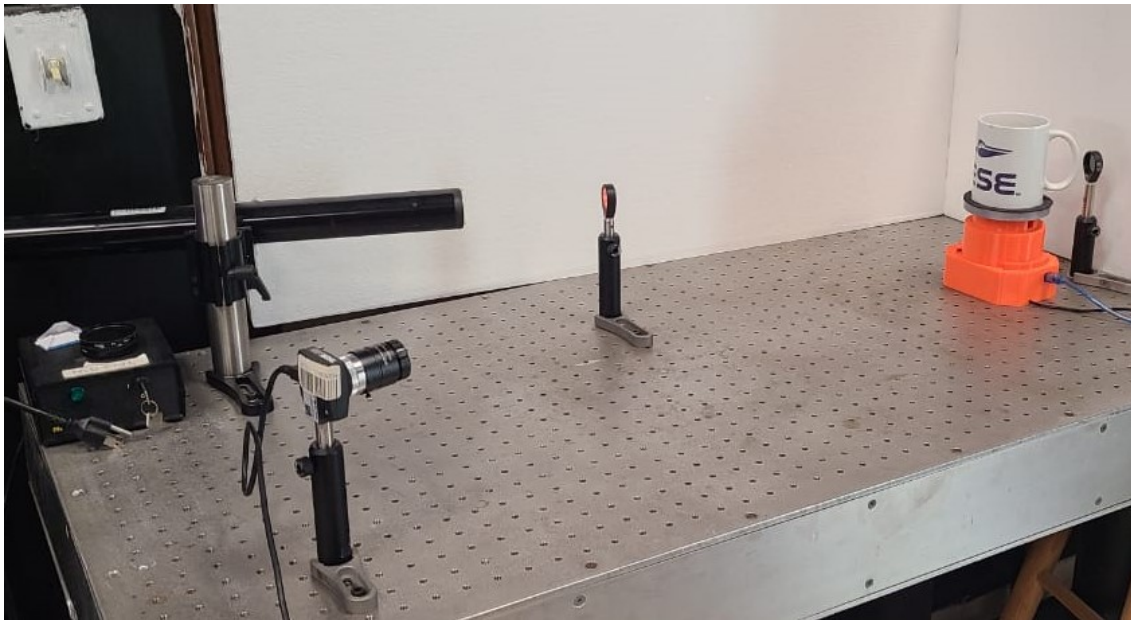


Figura 17. Sistema de escaneo tridimensional.

El sistema también incluye un sistema mecatrónico que controla la rotación de los objetos sobre la plataforma de escaneo. Este sistema, basado en un motor a pasos controlado mediante una placa Arduino y un driver de motor, permite realizar giros de 1.8° por paso. A cada paso, la cámara captura una imagen, completando 200 pasos para una rotación completa de 360° , permitiendo así la captura completa de la superficie del objeto.

Para la reconstrucción digital, se desarrollaron códigos en software MATLAB que permiten procesar las imágenes capturadas, realizar la selección de datos relevantes y convertir las coordenadas obtenidas a un sistema tridimensional, logrando así la representación digital del objeto escaneado.

3.6.1. Reconstrucción digital

Para la puesta en práctica del sistema de escaneo tridimensional desarrollado, se utilizó como objeto de estudio una taza de material cerámico de color blanco con letras azules. La superficie del objeto, al ser reflectante, facilita la interacción con la luz proyectada, lo que mejora la captura de imágenes por parte del sistema.

Como parte de los resultados obtenidos en la Figura 18 se presenta la reconstrucción digital de la taza

realizada con nuestro sistema de escaneo tridimensional. Aunque el modelo presenta algunas imperfecciones derivadas de las sombras generadas por la propia geometría del objeto, se logró reconstruir la forma general y los detalles característicos, como las letras en su superficie. Esto evidencia la capacidad del sistema para generar una nube de puntos.

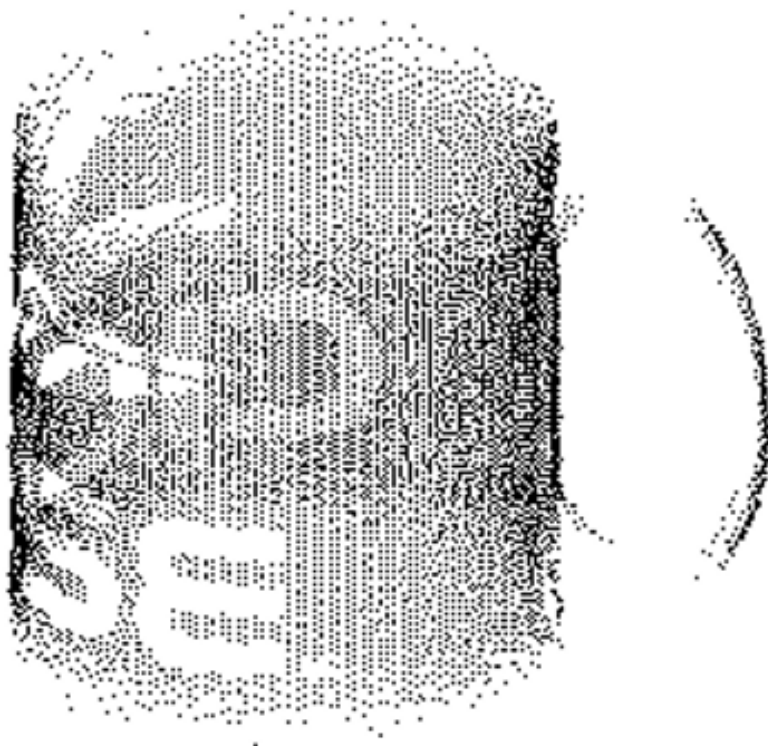


Figura 18. Ejemplo de la reconstrucción digital obtenida con el sistema de escaneo tridimensional desarrollado.

El sistema de escaneo tridimensional desarrollado ofrece una resolución espacial de 0.238 mm, lo que permite obtener una representación milimétrica de la superficie del objeto. El uso de haces de luz estructurados, en combinación con un diseño óptico, permite minimizar errores y maximizar la fidelidad de los datos obtenidos.

Capítulo 4. Conclusiones

Se demostró que es posible desarrollar un sistema de escaneo óptico tridimensional empleando haces de luz estructurados mediante elementos refractivos. La continuidad de la línea de luz generada permitió la adquisición simultánea de múltiples puntos de referencia sobre la superficie del objeto. Esta capacidad de capturar perfiles completos en una sola proyección es una alternativa a las discontinuidades presentes en los patrones de luz utilizados en dispositivos de escaneo tradicionales.

Durante el desarrollo del sistema, se validó que los haces de luz estructurados permitieron la reconstrucción de superficies regulares, capturando características geométricas detalladas y logrando una precisión espacial nominal de 0.238 mm. El objetivo principal del trabajo fue el desarrollo e implementación de un sistema optomecatrónico para reconstruir tridimensionalmente la superficie de objetos reflejantes mediante haces de luz estructurados, y caracterizar los límites y alcances del sistema para aplicaciones potenciales en la industria.

En este sentido, se lograron varios avances importantes. Se diseñó e implementó un sistema optomecatrónico compuesto por un láser He-Ne, una cámara CMOS y una lente de Powell para estructurar el haz de luz. La integración del sistema mecatrónico permitió controlar la rotación de los objetos y capturar secuencialmente los datos de la superficie.

Además, se incorporó una lente de Powell para la proyección de haces de luz estructurados, lo que mejoró la uniformidad en la captura de puntos en superficies regulares en comparación con las lentes cilíndricas. La distribución de intensidad más homogénea de la lente de Powell redujo en un 15 % las variaciones en la densidad de puntos.

También se identificaron aplicaciones potenciales del sistema para superficies reflejantes y regulares, aunque también se reconocieron limitaciones en el escaneo de superficies complejas. Estas observaciones pueden orientar futuros trabajos hacia la optimización del sistema para estos casos específicos.

En conclusión, se desarrolló un sistema funcional con capacidad de capturar datos tridimensionales detallados utilizando luz estructurada, sin embargo las limitaciones de resolución en superficies irregulares sugieren áreas de mejora. Estos resultados brindan una base sólida para futuras investigaciones y optimización de técnicas de reconstrucción, orientadas hacia aplicaciones industriales más complejas.

4.1. Limitaciones y alcances del sistema

El sistema de escaneo tridimensional desarrollado presenta tanto alcances como limitaciones derivados de los componentes y técnicas utilizados, así como de las decisiones de diseño implementadas en su configuración.

Alcances:

1. Adaptabilidad y control: al estar construido sobre un sistema mecatrónico controlado mediante Arduino, el escáner es versátil, permitiendo ajustes en la velocidad y el ángulo de rotación del objeto escaneado. Esto facilita su uso en diversas aplicaciones, desde escaneos simples hasta aquellos que requieren mayor precisión en la rotación y captura de detalles.
2. Configuración óptica optimizada: La incorporación de un láser He-Ne junto con una lente Powell nos permite generar una línea de luz continua con una distribución de intensidad homogénea. Este arreglo y mejora la estabilidad en la detección de los puntos de referencia, en comparación con las lentes cilíndricas convencionales. Al combinar esta configuración con la técnica de triangulación láser, se logra una mayor precisión en la captura de los bordes y detalles de la superficie del objeto escaneado, alcanzando una resolución espacial de 0.238 mm.
3. Procesamiento y reconstrucción personalizada: los códigos desarrollados en MATLAB para la reconstrucción digital permiten realizar un procesamiento específico de los datos capturados, como la selección de puntos relevantes y la conversión de coordenadas, lo cual contribuye a una reconstrucción 3D y personalizable según las necesidades de la aplicación.

Limitaciones:

1. Limitaciones en resolución y precisión: aunque se alcanzó una resolución aceptable de 0.238 mm, este sistema podría no ser suficiente para aplicaciones que requieren una precisión micrométrica, como en piezas de microfabricación o escaneos de superficies complejas y pequeñas.
2. Restricción en el tamaño del objeto: dado el diseño del sistema y su configuración óptica, el área de escaneo puede estar limitada por el campo de visión de la cámara y la capacidad del láser para cubrir la totalidad del objeto en rotación. Objetos más grandes que el campo de visión efectivo pueden requerir un sistema de escaneo adaptado o componentes de mayor alcance óptico.

3. Interferencia de luz ambiental: la configuración del sistema puede ser sensible a condiciones de iluminación ambiental, lo cual podría afectar la calidad de las capturas y la precisión de la reconstrucción si no se controla en un entorno de luz constante o bajo condiciones ambientales controladas.
4. Dependencia en la estabilidad del sistema mecánico: la precisión del escaneo depende también de la estabilidad de la plataforma de rotación y de los componentes mecánicos que soportan el sistema óptico. Vibraciones o desplazamientos no deseados pueden introducir errores en la captura de la nube de puntos.
5. Desafíos al capturar objetos con superficies complejas o irregulares: en superficies con variaciones abruptas o superficies rentrantes, donde el láser no logra reflejarse de forma consistente hacia la cámara, se presentan dificultades para detectar el haz de luz, generando áreas de sombra o “huecos” en la nube de puntos. Esta limitación afecta la continuidad del modelo 3D reconstruido, ya que se generan zonas sin datos que dificultan la reconstrucción completa de la geometría del objeto.

En conclusión, el sistema de escaneo desarrollado es una solución eficiente y adaptable, idónea para capturas de precisión media y aplicaciones flexibles. No obstante, para aplicaciones que requieran mayor resolución o estabilidad, el sistema podría necesitar ajustes adicionales o la incorporación de componentes ópticos y mecatrónicos más avanzados.

4.2. Áreas de oportunidad

Nuestro sistema de escaneo 3D presenta varias áreas de oportunidad y mejora que pueden incrementar su precisión, funcionalidad y adaptabilidad para diversas aplicaciones. A continuación, se destacan algunos de los principales aspectos a considerar:

1. Mejora de la resolución y precisión
 - Integración de una cámara de mayor resolución: una cámara de mayor resolución permitiría capturar detalles más finos de la superficie del objeto, mejorando la calidad de la nube de puntos y el modelo final.

- Control de iluminación ambiental: incluir filtros de luz o carcasas que minimicen la interferencia de la iluminación ambiental ayudaría a estabilizar la captura de datos.
2. Mejoras en el sistema mecatrónico
- Incorporación de un sistema de control de precisión para el motor a paso: ajustes de micro-stepping o el uso de motores con mayor precisión angular podrían mejorar el control en la rotación del objeto dándonos una mejor resolución mecánica.
 - Automatización del escaneo multiangular: implementar un sistema de rotación y traslación sincronizados que permita capturas en diferentes ángulos del objeto ayudaría a reducir las sombras y áreas no capturadas en superficies irregulares.
3. Ajustes en el procesamiento de datos
- Algoritmos de interpolación y relleno de huecos en la nube de puntos: implementar algoritmos que completen automáticamente los huecos generados por la falta de reflejo en superficies irregulares o texturizadas ayudaría a obtener modelos más completos.
 - Aplicación de filtros de reducción de ruido: incluir técnicas avanzadas de filtración, como el filtrado bilateral, puede reducir el ruido de la nube de puntos sin sacrificar la precisión de la geometría capturada.
4. Mejora de la eficiencia en la reconstrucción digital
- Automatización en el procesamiento de imágenes: la implementación de procesos de reconstrucción automatizados a partir de los datos obtenidos en MATLAB o software CAD permitiría una generación más rápida de los modelos 3D.
 - Uso de técnicas de inteligencia artificial: la integración de redes neuronales o algoritmos de machine learning para el post-procesamiento de datos ayudaría a optimizar el tiempo y la precisión en la reconstrucción de objetos complejos, especialmente en la identificación y relleno de puntos faltantes.
5. Adaptabilidad y flexibilidad en la configuración óptica
- Diseño modular del sistema: un diseño que permita intercambiar componentes ópticos (como lentes o cámaras) según las necesidades específicas de cada escaneo ofrecería una mayor versatilidad, permitiendo ajustes en función del tamaño y características del objeto.

- Configuración óptica variable: incorporar un sistema que ajuste automáticamente la posición del láser o la cámara permitiría la captura de objetos de mayor tamaño o superficies complejas sin la necesidad de modificar manualmente el sistema.

4.3. Trabajo a futuro

En este proyecto se ha logrado, hasta el momento, la generación de una nube de puntos que representa la superficie del objeto escaneado. No obstante, una de las áreas principales de trabajo a futuro radica en la reconstrucción digital para convertir esta nube de puntos en una superficie completa. Esta reconstrucción implica pasos adicionales, como el mallado y la generación de superficies a partir de los puntos capturados, lo que permitiría crear representaciones 3D utilizables en aplicaciones como ingeniería inversa, simulaciones y análisis estructurales. La implementación de algoritmos avanzados de interpolación y suavizado también podría mejorar la calidad y continuidad de los modelos generados, especialmente en áreas de datos faltantes debido a sombras o superficies irregulares.

Otra área crítica para el desarrollo es la creación de una interfaz integrada que permita vincular los diferentes subsistemas del escáner, como la cámara CMOS, el sistema mecatrónico y los procesos de reconstrucción digital. Esta interfaz, idealmente basada en una plataforma de software accesible, permitiría centralizar el control de todos los componentes, facilitando el ajuste de parámetros en tiempo real, la captura de datos y la transferencia directa de la información obtenida para su procesamiento posterior.

Por otro lado, un objetivo posterior sería implementar la reconstrucción digital en tiempo real. Este avance permitiría que, a medida que la cámara capture las imágenes del objeto en cada paso, el sistema genere progresivamente el modelo 3D. La reconstrucción en tiempo real, requiere optimizar tanto el procesamiento de datos como los algoritmos de reconstrucción, así como contar con un procesamiento paralelo eficiente. Esta funcionalidad sería particularmente útil en aplicaciones que requieren retroalimentación inmediata, como la inspección de calidad en líneas de producción.

A fin de comparar el funcionamiento, alcances y limitaciones del sistema desarrollado, se comparó el escaneo del mismo objeto de referencia empleando un sistema de escaneo láser 3D comercial, el cual también está basado en la técnica de triangulación. El sistema comercial utiliza dos diodos láser rojos clase 1 (sin información técnica) para proyectar líneas sobre el objeto que gira en la plataforma, permitiendo capturar tanto la geometría como las texturas del mismo. El sistema cuenta con una cámara Logitech

C270 HD y un motor paso a paso NEMA, que controla la rotación de la plataforma a 1.8° por paso.

El software utilizado para controlar el escáner es Horus, de código abierto, el cual se encarga del movimiento del motor, la captura de datos, procesamiento de imágenes y la generación de nubes de puntos a partir de las imágenes adquiridas.



Figura 19. Escaner comercial.

El escáner comercial ofrece un área de escaneo con un diámetro de 250 mm y una altura máxima de 205 mm. Cuenta con una precisión de 0.5 mm lo cual significa que puede capturar detalles moderados en las superficies del objeto, suficiente para aplicaciones donde no se requiere una alta resolución. En la Figura 20 se observa la reconstrucción tridimensional que se obtuvo al poner a prueba el escaner comercial.

En la comparación entre el sistema de escaneo 3D que hemos desarrollado y el escáner comercial, es importante destacar que, aunque ambos sistemas cumplen con el objetivo de capturar la geometría de un objeto, la naturaleza de los procedimientos y la funcionalidad de cada uno varía significativamente.

El sistema desarrollado, basado en Arduino y motores paso a paso, nos permite tener un control total sobre los parámetros de operación, lo que lo convierte en una solución flexible y adaptable para diferentes aplicaciones. Este control directo sobre el sistema nos permite ajustar aspectos como la velocidad de escaneo, la resolución y la configuración de los componentes ópticos, lo que ofrece una mayor versatilidad en comparación con el sistema comercial, que está más orientado a un uso específico y limitado. Además, con nuestro sistema, es posible calcular métricas como la resolución y otros parámetros relacionados con la calidad de la captura, algo que no es posible con el sistema comercial, ya que solo proporciona la imagen 3D sin datos métricos detallados.



Figura 20. Reconstrucción tridimensional obtenida con el sistema comercial.

Por otro lado, la calidad de escaneo se puede evaluar visualmente al comparar las imágenes 3D obtenidas por ambos sistemas. En este caso, el sistema comercial presenta una calidad visual notablemente superior, con mayor nivel de detalle y precisión en la geometría del objeto. Sin embargo, al no poder acceder a las métricas subyacentes del escaneo comercial, la comparación se basa únicamente en los resultados visuales.

En la Tabla 3, se presenta una comparación entre el sistema de escaneo 3D que hemos desarrollado y el escáner comercial. Ambos sistemas se evaluaron en términos de parámetros clave, como la resolución, precisión, flexibilidad y facilidad de uso.

Estas áreas de oportunidad no solo mejorarán la precisión y capacidad de nuestro sistema de escaneo 3D, sino que permitirán su uso en una gama más amplia de aplicaciones, desde ingeniería de precisión hasta conservación de patrimonio y manufactura.

Tabla 3. Comparación de algunos parámetros entre nuestro sistema desarrollado y el sistema comercial.

Parámetro	Sistema Propio	Sistema Comercial
Resolución (profundidad)	0.238 mm	0.5 mm (datos del fabricante)
Velocidad de escaneo	7 minutos (promedio)	De 2 a 8 minutos (datos del fabricante)
Reconstrucción de la superficie	Trabajo a futuro	Pérdida de información en superficies que absorben luz
Adaptabilidad	Puede adaptarse a diferentes ambientes	Limitado a objetos a distancias menores a 50 cm
Control y adaptabilidad	Podemos modificar diferentes componentes del sistema (longitud de onda, cámara, lentes, contraste de imágenes, etc)	Solo se puede modificar parámetros de su software
Facilidad de uso	Requiere conocimientos especializados para su operación	Plug and play

Literatura citada

- Akdim, A., Mahdaoui, A., Roukhe, H., Marhraoui Hseini, A., Bouazi, A., & Roukhe, A. (2022). A study and comparison of different 3d reconstruction methods following quality criteria. *International Journal of Advances in Soft Computing & Its Applications*, 14(3). <https://doi.org/10.15849/IJASCA.221128.09>.
- Angelsky, O. V., Bekshaev, A. Y., Dragan, G., Maksimyak, P., Zenkova, C. Y., & Zheng, J. (2021). Structured light control and diagnostics using optical crystals. *Frontiers in Physics*, 9, 715045. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.715045>.
- Aycardi Salgado, L. C. & Tuirán Moreno, H. J. (2018). Diseño y construcción de una impresora 3d de gran formato con tecnología de fabricación con filamento fundido (fff) tipo core-xy basada en arduino. Tesis de Maestría, Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/661>.
- Beraldin, J.-A., Blais, F., Boulanger, P., Cournoyer, L., Domey, J., El-Hakim, S., Godin, G., Rioux, M., & Taylor, J. (2000). Real world modelling through high resolution digital 3d imaging of objects and structures. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(4), 230–250. [https://doi.org/10.1016/s0924-2716\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/s0924-2716(00)00013-7).
- Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., & Taubin, G. (1999). The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 5(4), 349–359. <https://doi.org/10.1109/2945.817351>.
- Bernd, D., Henriette, M., Gross, H., et al. (2012). *Handbook of optical systems, volume 5: Metrology of optical components and systems*. John Wiley & Sons.
- Bewsher, A. & Boland, W. (1994). Design of a single-element laser-beam uniform cross projector. *Applied optics*, 33(31), 7367–7370. <https://doi.org/10.1364/ao.33.007367>.
- Bolton, W. (2003). *Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Pearson Education.
- Bonod, N. & Neauport, J. (2016). Diffraction gratings: from principles to applications in high-intensity lasers. *Advances in Optics and Photonics*, 8(1), 156–199. <https://doi.org/10.1364/aop.8.000156>.
- Caminero, M., Chacón, J., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. (2018). Impact damage resistance of 3d printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>.
- Chang, W.-Y., Hsu, J.-W., & Hsu, B.-Y. (2018). 3d scanning system of structured light for aiding work-piece position of cnc machine tool. In *2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*, 388–391. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AMCON.2018.8614757>.
- Chen, S.-Y., Lin, W.-C., & Chen, C.-T. (1991). Automated surface interpolation technique for 3-d object reconstruction from serial cross sections. *Computerized medical imaging and graphics*, 15(4), 265–276. [https://doi.org/10.1016/0895-6111\(91\)90085-a](https://doi.org/10.1016/0895-6111(91)90085-a).
- Clark, T. W., Offer, R. F., Franke-Arnold, S., Arnold, A. S., & Radwell, N. (2016). Comparison of beam generation techniques using a phase only spatial light modulator. *Opt. Express*, 24(6), 6249–6264. <https://doi.org/10.1364/OE.24.006249>.

- Cojocar, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C.-O., & Marginean, G. (2022). The influence of the process parameters on the mechanical properties of pla specimens produced by fused filament fabrication—a review. *Polymers*, 14(5), 886. <https://doi.org/10.3390/polym14050886>.
- Condit, R. & Jones, D. W. (2004). Stepping motors fundamentals. *Microchip Inc. Publication AN907*, 1–22. <https://www.bristolwatch.com/pdf/stepper.pdf>.
- Conrady, A. E. (2013). *Applied optics and optical design, part one*. Courier Corporation.
- Cortés, F. R., Cid, J., & Vargas, E. (2013). *Mecatrónica: control y automatización*. Alpha Editorial.
- Daul, C., Blondel, W., Ben-Hamadou, A., Miranda-Luna, R., Soussen, C., Wolf, D., & Guillemin, F. (2010). From 2d towards 3d cartography of hollow organs. In *2010 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control*, 285–293. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5608606>.
- Dizon, J. R. C., Espera Jr, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3d-printed polymers. *Additive manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
- Donati, S. & Norgia, M. (2018). Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering. *Optical engineering*, 57(5), 051506–051506. <https://doi.org/10.1117/1.oe.57.5.051506>.
- Ebrahim, M. A.-B. (2015). 3d laser scanners' techniques overview. *Int J Sci Res*, 4(10), 323–331. https://www.researchgate.net/profile/Mostafa-Ebrahim-3/publication/282753883_3D_Laser_Scanners'_Techniques_Overview/links/561b66cb08ae044edbb24210/3D-Laser-Scanners-Techniques-Overview.pdf.
- Edl, M., Mizerák, M., & Trojan, J. (2018). 3d laser scanners: history and applications. *Acta Simulatio*, 4(4), 1–5. <https://doi.org/10.22306/asim.v4i4.54>.
- Farn, M. W. & Goodman, J. W. (1991). Diffractive doublets corrected at two wavelengths. *JOSA A*, 8(6), 860–867. <https://doi.org/10.1364/josaa.8.000860>.
- Fonseca, J., Baptista, A., Martins, M. J., & Torres, J. P. N. (2017). Distance measurement systems using lasers and their applications. *Applied Physics Research*, 9(4), 33–43. <https://doi.org/10.5539/apr.v9n4p33>.
- Forbes, A. (2019). Structured light from lasers. *Laser & Photonics Reviews*, 13(11), 1900140. <https://doi.org/10.1002/lpor.201970043>.
- Forbes, A. (2020). Structured light: tailored for purpose. *Opt. Photon. News*, 31(6), 24–31. <https://doi.org/10.1364/opn.31.6.000024>.
- Gil, P., Manchón Lopez, E. J., Torres, F., Pomares, J., & Ortiz Zamora, F. G. (2002). Reconstrucción tridimensional de objetos con técnicas de visión y luz estructurada. *Federación Internacional de Automatización. Comité Español de Automática*. <https://doi.org/10.13053/rcs-148-8-7>.
- Golias, N. & Tsiboukis, T. (1994). An approach to refining three-dimensional tetrahedral meshes based on delaunay transformations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(5), 793–812. <https://doi.org/10.1002/nme.1620370506>.
- Gomes, L., Bellon, O. R. P., & Silva, L. (2014). 3d reconstruction methods for digital preservation of cultural heritage: A survey. *Pattern Recognition Letters*, 50, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.03.023>.

- Grant, M. (2005). Quick start for beginners to drive a stepper motor. *Freescale Semiconductors*, [online], 17, 18–20. <https://patarnott.com/atms748/pdf/Class2018/AN2974.pdf>.
- Gustavo, R.-M., Valentin, G.-R., Hilariona, M., & Lopez, L. (2011). Integración de sistema de digitalización 3d usando matlab. In *10º Congreso Nacional de Mecatrónica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. <https://www.mecamex.net/anterior/cong10/trabajos/art17.pdf>.
- Haleem, A., Gupta, P., Bahl, S., Javaid, M., & Kumar, L. (2021). 3d scanning of a carburetor body using comet 3d scanner supported by colin 3d software: Issues and solutions. *Materials Today: Proceedings*, 39, 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.427>.
- Han, X.-F., Jin, J. S., Wang, M.-J., Jiang, W., Gao, L., & Xiao, L. (2017). A review of algorithms for filtering the 3d point cloud. *Signal Processing: Image Communication*, 57, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.image.2017.05.009>.
- Hayashibe, M., Suzuki, N., & Nakamura, Y. (2006). Laser-scan endoscope system for intraoperative geometry acquisition and surgical robot safety management. *Medical Image Analysis*, 10(4), 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.media.2006.03.001>.
- Hecht, E. (2017). Optics (5^a ed). Adelphi University, Boston, Columbus.
- Hunde, B. R. & Woldeyohannes, A. D. (2022). Future prospects of computer-aided design (cad)—a review from the perspective of artificial intelligence (ai), extended reality, and 3d printing. *Results in Engineering*, 14, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100478>.
- Johnston, T. F. & Sasnett, M. W. (2004). Characterization of laser beams: The m^2 model. *Optical engineering -New York- Macel Dekker Incorporated-*, 90, 1–70. <https://doi.org/10.1201/9781315218243-1>.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). Poisson surface reconstruction. In *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, volume 7. https://www.cse.iitb.ac.in/~cs749/spr2016/handouts/kazhdan_poisson.pdf.
- Kilpelä, A., Pennala, R., & Kostamovaara, J. (2001). Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements. *Review of Scientific Instruments*, 72(4), 2197–2202. <https://doi.org/10.1063/1.1355268>.
- Kim, G., Domínguez-Caballero, J. A., & Menon, R. (2012). Design and analysis of multi-wavelength diffractive optics. *Optics express*, 20(3), 2814–2823. <https://doi.org/10.1364/oe.20.002814>.
- Kurup, A. & Bos, J. (2021). Dsor: A scalable statistical filter for removing falling snow from lidar point clouds in severe winter weather. *arXiv preprint arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.0707>.
- Leberl, F., Meixner, P., Wendel, A., & Irschara, A. (2012). Automated photogrammetry for three-dimensional models of urban spaces. *Optical engineering*, 51(2), 021117–021117. <https://doi.org/10.1117/1.oe.51.2.021117>.
- Li, J., Niu, H., & Niu, Y. (2017). Laser feedback interferometry and applications: a review. *Optical engineering*, 56(5), 050901–050901. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.5.050901>.
- Lin, W.-C., Chen, S.-Y., & Chen, C.-T. (1989). A new surface interpolation technique for reconstructing 3d objects from serial cross-sections. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 48(1), 124–143. <https://doi.org/10.1109/icpr.1988.28452>.

- Lipson, H. & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Logozzo, S., Valigi, M. C., & Canella, G. (2018). Advances in optomechatronics: An automated tilt-rotational 3d scanner for high-quality reconstructions. In *Photonics*, volume 5, 42. MDPI. <https://doi.org/10.3390/photonics5040042>.
- Lorensen, W. E. & Cline, H. E. (1998). Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. 347–353. <https://doi.org/10.1145/280811.281026>.
- Low, Z.-X., Chua, Y. T., Ray, B. M., Mattia, D., Metcalfe, I. S., & Patterson, D. A. (2017). Perspective on 3d printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of membrane science*, 523, 596–613. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.006>.
- Malik, A. S. (2011). *Depth map and 3D imaging applications: algorithms and technologies: algorithms and technologies*. Igl global. <https://khub.utp.edu.my/scholars/id/eprint/1474>.
- May, S., Droschel, D., Holz, D., Fuchs, S., Malis, E., Nüchter, A., & Hertzberg, J. (2009). Three-dimensional mapping with time-of-flight cameras. *Journal of Field Robotics*, 26(11-12), 934–965. <https://doi.org/10.1002/rob.20321>.
- Melenka, G. W., Cheung, B. K., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2016). Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3d printed structures. *Composite Structures*, 153, 866–875. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>.
- Moons, T., Van Gool, L., & Vergauwen, M. (2010). 3d reconstruction from multiple images part 1: Principles. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 4(4), 287–404. <https://doi.org/10.1561/9781601982858>.
- Moreno-Oliva, V. I., Román-Hernández, E., Rafael-Esesarte, S. A., & García-Hernández, R. (2014). Prueba de calidad en la superficie reflectora de un concentrador solar de canal parabólico con el uso de luz estructurada. *CienciaUAT*, 8(2), 68–72. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v8i2.296>.
- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Bienvenido-Huertas, D., & Marín-García, D. (2020). Validation of close-range photogrammetry for architectural and archaeological heritage: Analysis of point density and 3d mesh geometry. *Remote sensing*, 12(21), 3571. <https://doi.org/10.3390/rs12213571>.
- Müller, H. & Klingert, A. (1991). Surface interpolation from cross sections. *Springer*, 139–189. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77165-1_7.
- Okarma, K. & Grudziński, M. (2012). The 3d scanning system for the machine vision based positioning of workpieces on the cnc machine tools. In *2012 17th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*, 85–90. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MMAR.2012.6347906>.
- Palmer, C. & Loewen, E. (2005). *Diffraction Grating Handbook*. Newport Corporation. <https://books.google.com.mx/books?id=SWl-PAAACAAJ>.
- Parmar, S. J., Zala, M. S., Thaker, I. S., & Solanki, K. M. (2017). Design and development of stepper motor position control using arduino mega 2560. *International Journal of Science Technology and Engineering*, 3(09).
- Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., & Pedrotti, L. S. (2018). *Introduction to optics*. Cambridge University Press.
- Peterson, C. (2001). How it works: the charged-coupled device, or ccd. *Journal of young investigators*, 3(1). <https://www.if.ufrgs.br/~marcia/ccd.html>.

- Piegl, L. & Tiller, W. (2012). *The NURBS book*. Springer Science & Business Media.
- Powell, I. (1987). Design of a laser beam line expander. *Applied optics*, 26(17), 3705–3709. <https://doi.org/10.1364/ao.26.003705>.
- Purcell, E. J., Varberg, D. E., & Castillo, R. H. P. (1993). *Cálculo con geometría analítica*. Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., & Scopigno, R. (2001). A low cost 3d scanner based on structured light. In *computer graphics forum*, volume 20, 299–308. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>.
- Rojas, I. M., Robledo, M. P., de la Rosa, F. J. C., & Arguijo, P. (2019). Reconstrucción tridimensional de objetos mediante el uso de luz estructurada. *Res. Comput. Sci.*, 148(8), 91–103. <https://doi.org/10.13053/racs-148-8-7>.
- Rubinsztein-Dunlop, H., Forbes, A., Berry, M. V., Dennis, M. R., Andrews, D. L., Mansuripur, M., Denz, C., Alpmann, C., Banzer, P., Bauer, T., Karimi, E., Marrucci, L., Padgett, M., Ritsch-Marte, M., Litchinitser, N. M., Bigelow, N. P., Rosales-Guzmán, C., Belmonte, A., ... , & Weiner, A. M. (2016). Roadmap on structured light. *Journal of Optics*, 19(1), 013001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/19/1/013001>.
- Rusinkiewicz, S. & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the icp algorithm. In *Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling*, 145–152. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423>.
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3d printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing*, 35, 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
- Son, S., Park, H., & Lee, K. H. (2002). Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *International Journal of machine tools and manufacture*, 42(8), 889–897. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(02\)00030-5](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(02)00030-5).
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 66(4), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005>.
- Struck, R., Cordoni, S., Aliotta, S., Pérez-Pachón, L., & Gröning, F. (2019). Application of photogrammetry in biomedical science. *Biomedical Visualisation: Volume 1*, 121–130. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06070-1_10.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- Turchetta, R. (2020). Complementary metal-oxide-semiconductor (cmos) sensors for high-performance scientific imaging. 289–317. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102434-8.00010-6>.
- Verykokou, S. & Ioannidis, C. (2023). An overview on image-based and scanner-based 3d modeling technologies. *Sensors*, 23(2), 596. <https://doi.org/10.3390/s23020596>.
- Villa Fernández, A. (2020). Diseño y fabricación de un escáner 3d sin contacto basado en las plataformas arduino y matlab. Tesis de maestría, Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/19659>.

- Wang, Y., Zheng, J., & Wang, H. (2019). Fast mesh simplification method for three-dimensional geometric models with feature-preserving efficiency. *Scientific Programming*, 2019(1), 4926190. <https://doi.org/10.1155/2019/4926190>.
- WE, L. (1987). Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. *Computer graphics*, 21(1), 7–12. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>.
- Wijaya, A. P., Tamami, N., & Oktavianto, H. (2022). Surface 3d scanner using time of flight ranging sensor with cylindrical coordinate system. *Jurnal Teknik Mesin dan Mekatronika (Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics)*, 7(1), 35–50. <https://doi.org/10.33021/jmem.v7i1.1477>.
- Young, S., Lee, J., Hodges, R., Chang, T., Elashoff, D., & White, S. (2009). A comparative study of high-resolution cone beam computed tomography and charge-coupled device sensors for detecting caries. *Dentomaxillofacial radiology*, 38(7), 445–451. <https://doi.org/10.1259/dmfr/88765582>.
- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J., & Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne lidar data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(4), 872–882. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.810682>.

Anexos

Anexo A: Programa diseñado para el control del motor a pasos.

```

void setup() //inicilización de puertos
{
    pinMode(4, OUTPUT); //pin de paso
    pinMode(7, OUTPUT); //pin de dirección
    pinMode(8, OUTPUT); //pin de habilitación de driver motor
}

void loop()
{
    delay (20000);
    digitalWrite(8, LOW); // Habilita el Driver
    digitalWrite(7, LOW); // Dirección de giro (por ejemplo, LOW para un sentido, HIGH para el otro)

    for (int i = 0; i < 200; i++)
    {
        delay (2000);
        for (int i = 0; i < 1; i++)
        {
            digitalWrite(4, HIGH); delay(10); //tiempo estado alto en ms
            digitalWrite(4, LOW); delay(10); //tiempo estado bajo en ms
        }
    }
    digitalWrite(8, HIGH); // Quita la habilitación del Driver

    delay (10000);
    digitalWrite(8, LOW); // Habilita el Driver
    digitalWrite(7, HIGH); // Dirección de giro (por ejemplo, LOW para un sentido, HIGH para el otro)

    for (int i = 0; i < 200; i++)
    {
        digitalWrite(4, HIGH); delay(10); //tiempo estado alto en ms
        digitalWrite(4, LOW); delay(10); //tiempo estado bajo en ms
    }
    digitalWrite(8, HIGH); // Quita la habilitación del Driver
    exit(0);
}

```

Figura 21. Código desarrollado para el control del motor a pasos.

Anexo B: Script para reconstrucción numérica tridimensional del objeto.

```

dx=0.1;           % dimensión de un pixel (en x, horizontal)
dz=0.2;           % dimensión de un pixel (en z, vertical)
dr = 178.2;       % valor del ángulo de rotación
k=1;              % contador auxiliar
index=[1:1:200];  % valores de las imágenes (consecutivo)

for j=1:numel(index) % inicia ciclo para lectura de imágenes
    ang=index(j)*dr; % ángulo de rotación
    ang=ang*pi/180;  % convierte ángulo a radianes
    file=['PLVI_' num2str(index(j)) '.png']; %lectura de archivos
    A=imread(file);  % covierte imagen a un tensor RGB
    A=rgb2gray(A);   % convierte tensor RGB a una matriz en escala de grises
    A=flipud(A);     % voltea imagen de cabeza
    [ny mx]=size(A); % tamaño (ne pixeles) de la matriz

    ref=mx/2;

    for jj = 1:ny-10 % inicia ciclo para lectura de renglones de cada imagen
        v = A(jj,:); % renglón j-ésimo de la imagen
        if max(v) > 35 % criterio de contraste de intensidad
            [a b] = find(v==max(v)); % valor(es) máximo(s) de intensidad
            pos(k) = round(mean(b)); % centro de los máximos (promedio)
            d(k) = abs(pos(k) - (ref)); % distancia del eje al máximo
            if pos(k) < ref % si está a la izquierda del eje
                r(k) = d(k)*dx; % valor del radio del objeto
            else % si está a la derecha del eje (hay que verificar esta condición)
                r(k) = -d(k)*dx;
            end
            z(k) = jj*dz; % valor de la coordenada en z
            tet(k) = ang; % valor del ángulo
            x(k) = r(k)*cos(tet(k)); % valor de la coordenada x
            y(k) = r(k)*sin(tet(k)); % valor de la coordenada z
            k=k+1; % incrementa contador auxiliar
        else
            jj=jj+1; % incrementa contador de renglones
        end
    end
    M=[x',y',z']; % valores de las coordenadas de la nube de puntos
end

```

Figura 22. Script para reconstrucción numérica tridimensional del objeto.

Anexo C: Plano para el diseño en CAD de la estructura de la parte superior.

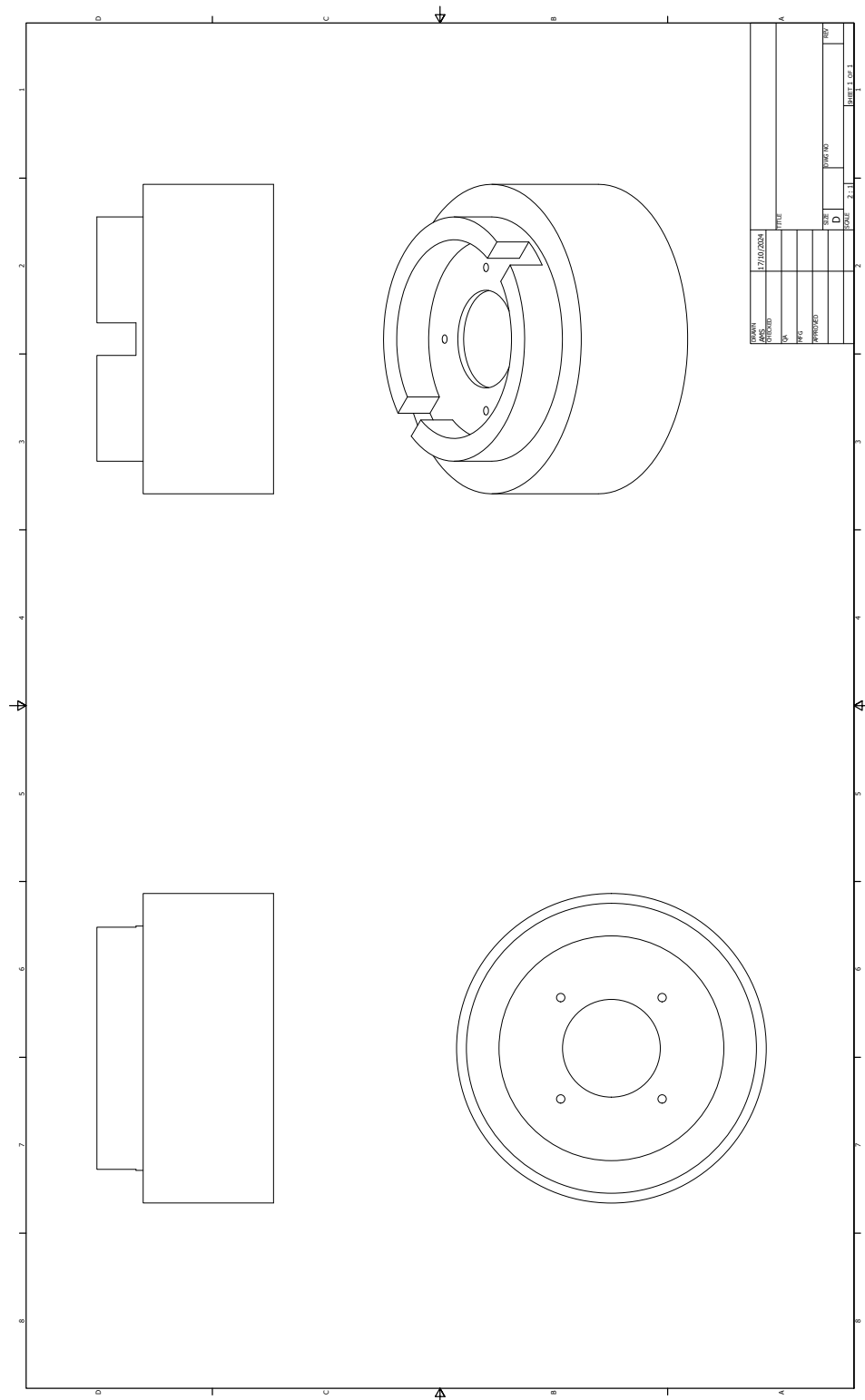


Figura 23. Plano de la estructura de la parte superior

