



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA MECÁNICA DE DOS
GRADOS DE LIBERTAD PARA LA ASISTENCIA EN LA
DIGITALIZACIÓN 3D DE PIEZAS MECÁNICAS**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Gianmarco Fernández Santana
Allison Delia Game Valencia
TUTOR: M.Sc. David Cortez Saravia

Guayaquil - Ecuador
2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Gianmarco Fernández Santana** con documento de identificación N° **0951922293** y **Allison Delia Game Valencia** con documento de identificación N° **0927191544**; manifestamos que:

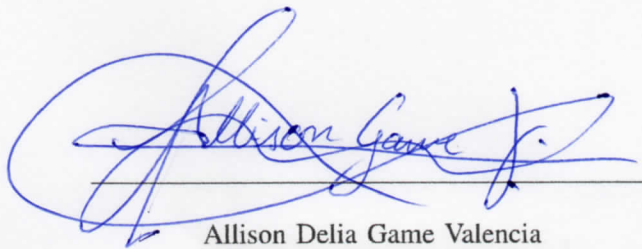
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 18 de febrero del 2026

Atentamente,

Gianmarco Fernández

Gianmarco Fernández Santana
0951922293



Allison Delia Game Valencia
0927191544

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Gianmarco Fernández Santana** con documento de identificación N° **0951922293** y **Allison Delia Game Valencia** con documento de identificación N° **0927191544**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA MECÁNICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA LA ASISTENCIA EN LA DIGITALIZACIÓN 3D DE PIEZAS MECÁNICAS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del 2026

Atentamente,

Gianmarco Fernández d

Gianmarco Fernández Santana
0951922293

Allison Delia Game Valencia

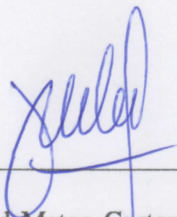
Allison Delia Game Valencia
0927191544

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **David Mateo Cortez Saravia**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA MECÁNICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA LA ASISTENCIA EN LA DIGITALIZACIÓN 3D DE PIEZAS MECÁNICAS**, realizado por **Gianmarco Fernández Santana** con documento de identificación N° **0951922293** y por **Allison Delia Game Valencia** con documento de identificación N° **0927191544**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del 2026

Atentamente,



Ing. David Mateo Cortez Saravia, Mg.
0963020193

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi mamá Gladys de las Mercedes Santana Almeida y a mi papá Julio Antonio Fernández Zerna, por su amor inmenso, su apoyo incondicional y su comprensión infinita; gracias por estar a mi lado en cada caída y por hacer lo imposible, a pesar de las dificultades, para que nunca me faltara nada en estos años de estudio. A mi tío Juan Carlos Fernández Zerna, por su respaldo y por ser pilar fundamental en este camino.

Finalmente, dedico este logro de manera especial a mi hermana, Natasha Nicole Fernández Santana, cuya partida me enseñó la fuerza que uno necesita para salir adelante apesar de las adversidades. Tu memoria es mi mayor orgullo y el impulso que me recordó, en los momentos más oscuros, que debía seguir adelante hasta cumplir nuestra meta.

Gianmarco Fernández Santana

Este trabajo de titulación está dedicado a mi familia, quienes con su amor y apoyo han sido los cimientos de toda mi vida académica; a mi papá, Gustavo Game, por estar siempre dispuesto a acompañarme a donde sea necesario para velar por mi bienestar, por mover cielo, mar y tierra para conseguir cualquier material que necesitara, por más difícil que fuera encontrarlo; a mi hermana, Estefanía Game, por ser mi mayor ejemplo a lo largo de mi vida, no podría haber tenido uno mejor que ella, quien ha sido guía, inspiración y motivación constante; a mi mamá, Purita Valencia, el pilar de mi hogar, la persona que más amo en este mundo y a quien más admiro, la persona más fuerte que conozco; gracias a ella soy quien soy hoy, y su amor incondicional ha sido la fuerza que me ha mantenido de pie en cada momento; y por supuesto, sin dejar de mencionar a mi perrita Kandy (con K), mi otra hermanita que la vida me regaló. Ha estado conmigo durante 12 años y nunca faltó en estos cuatro años de carrera; siempre me recibía emocionada cuando llegaba de la universidad y me acompañaba en las madrugadas mientras hacía mis deberes, descansando en su sofá aunque la sala estuviera vacía y yo siguiera trabajando, hasta que terminaba llevándola al cuarto para que duerma, como parte de nuestra rutina.

Dedico esta investigación a toda mi familia, porque gracias a ellos he podido culminar esta etapa. Este logro no es solo mío, sino el resultado del trabajo en equipo que hemos construido como familia, donde cada uno aportó su granito de arena para salir adelante juntos. Porque el triunfo de uno es el triunfo de todos.

Allison Delia Game Valencia

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia por los valores que me han inculcado desde temprana edad, los cuales han formado a la persona que soy y al profesional que deseo ser a futuro. No son solo valores; son experiencias y vivencias que me acompañarán por siempre. Agradezco que así sea, pues no podría haber pedido una guía mejor.

Expreso mi gratitud a los docentes de la carrera, quienes fueron los pilares de nuestra formación durante estos cuatro años; un tiempo que, al mirar atrás, parece breve pero en el cual logramos un aprendizaje inmenso. Entre los docentes que destacaron en mi formación, agradezco de manera especial a nuestro tutor de tesis, el Ing. David Cortés, por su presencia constante, sus consejos y su disposición absoluta para guiarnos en nuestro desarrollo académico. Asimismo, hago extensivo mi agradecimiento al Ing. Pablo Echeverría, por su apoyo continuo y compromiso a lo largo de este camino universitario.

Agradezco, además, de manera especial a todas las amistades que he tenido la fortuna de conocer en estos años de estudio; personas que fueron fundamentales en mi desarrollo y mi apoyo tanto en los días oscuros como en los momentos de alegría. Destaco de forma muy especial a mi mejor amiga y compañera de tesis, Allison, pues gracias a su amistad y compañía logramos avanzar con éxito en todo este proceso de titulación y en los diversos retos que se nos presentaron. El apoyo mutuo en los diferentes retos que se nos presentaron en semestres anteriores fue nuestra constante para seguir adelante, y no podría estar más feliz de compartir este gran logro con mi mejor amiga.

Gianmarco Fernández Santana

Agradezco a los docentes de la carrera, quienes han sido parte fundamental en nuestra formación profesional, ya que, además de ser profesores, en muchas ocasiones se sintieron como amigos con quienes se podía conversar y aprender más allá de lo académico. De manera especial, agradezco al Ing. David Cortés, uno de nuestros docentes favoritos, por ser un gran ejemplo durante estos años y un apoyo constante en este proceso de titulación.

Agradezco a mi familia por estar siempre a mi lado durante estos años, por su apoyo incondicional y por no dejarme caer en los momentos difíciles.

Agradezco también a mis amigos, en especial a aquellos que me dio la universidad, quienes hicieron mucho más llevadera esta etapa de esfuerzo y cansancio. Compartir con ellos fue, sin duda, una de mis mayores motivaciones para seguir adelante.

Finalmente, agradezco a Gianmarco, por ser el mejor compañero de tesis que pude haber tenido y un apoyo fundamental durante estos cuatro años de carrera. Han sido años en los que nos hemos apoyado mutuamente sin dejarnos caer, superando juntos cada reto. A pesar de nuestras responsabilidades diarias, siempre encontramos la manera de sacar adelante tareas, proyectos y exámenes, ayudándonos y explicándonos los temas entre nosotros. Si uno fallaba, el otro estaba ahí para levantarlo. Agradezco profundamente haberlo conocido y haber culminado esta etapa tan importante junto a él.

Allison Delia Game Valencia

RESUMEN

El escaneo tridimensional ha ganado relevancia en ingeniería inversa, diseño asistido por computadora y manufactura digital, pero los equipos comerciales resultan costosos y de acceso limitado en instituciones educativas y tecnológicos con presupuestos restringidos en Ecuador. Esta tesis presenta el desarrollo de una plataforma mecánica de dos grados de libertad (pan-tilt) automatizada, construida principalmente con aluminio reciclado de latas de bebidas mediante fundición con arena, para asistir en la captura de imágenes multiángulo en procesos de fotogrametría de bajo costo.

El objetivo general fue diseñar e implementar un mecanismo que controle de manera automática la posición y orientación de una cámara Arducam IMX519 de 16 Mpx, integrada con una Raspberry Pi 4B con Pi-Shield, motores paso a paso NEMA 17 y controladores A4988, junto con iluminación LED y un polarizador para reducir reflejos. Se emplearon materiales reciclables y componentes de bajo costo, logrando un presupuesto estimado inferior al de escáneres comerciales comparables. La plataforma garantiza trayectorias estables, mejorando la superposición de imágenes y la calidad de la reconstrucción tridimensional mediante el software de código abierto OpenScanCloud (toma de fotografías para una posterior generación de nube de puntos, malla y textura en formatos .OBJ/.STL).

Las pruebas de validación con piezas mecánicas demuestran una reducción significativa de errores geométricos y artefactos en comparación con escaneos realizados mediante aplicaciones de fotogrametría en teléfonos móviles (tales como Polycam, 3D Scanner App o similares). Este avance se logra gracias al control automatizado de la intensidad de la iluminación mediante LEDs ajustables dentro de la caja de acrílico, lo que permite adaptar el nivel de luz según el tipo de pieza y sus características superficiales. De esta forma se optimiza la captura de detalles, se minimizan reflejos y se mejora la calidad general de los modelos 3D reconstruidos. Los resultados promueven la accesibilidad educativa y la replicabilidad en entornos de bajos recursos.

Palabras clave: escaneo 3D, fotogrametría, plataforma pan-tilt, aluminio reciclado, bajo costo.

ABSTRACT

Three-dimensional scanning has gained relevance in fields such as reverse engineering, computer-aided design, and digital manufacturing; however, commercial equipment remains expensive and has limited accessibility in educational and technological institutions with restricted budgets in Ecuador. This thesis presents the development of an automated two-degree-of-freedom (pan-tilt) mechanical platform, built mainly from recycled aluminum obtained from beverage cans through sand casting, to assist in multi-angle image acquisition for low-cost photogrammetry processes.

The general objective was to design and implement a mechanism capable of automatically controlling the position and orientation of a 16 Mpx Arducam IMX519 camera, integrated with a Raspberry Pi 4B with Pi-Shield, NEMA 17 stepper motors, and A4988 drivers, together with LED lighting and a polarizer to reduce reflections. Recyclable materials and low-cost components were used, achieving an estimated budget lower than that of comparable commercial scanners. The platform ensures stable trajectories, improving image overlap and enhancing the quality of the three-dimensional reconstruction through the open-source software OpenScanCloud (image acquisition followed by the generation of point clouds, meshes, and textures in .OBJ/.STL formats).

Validation tests conducted with mechanical parts demonstrate a significant reduction in geometric errors and artifacts compared to scans performed using photogrammetry applications on mobile devices (such as Polycam, 3D Scanner App, or similar). This improvement is achieved through automated control of lighting intensity using adjustable LEDs within the acrylic enclosure, allowing the light level to be adapted according to the type of object and its surface characteristics. In this way, detail capture is optimized, reflections are minimized, and the overall quality of the reconstructed 3D models is improved. The results promote educational accessibility and replicability in low-resource environments.

Keywords: 3D scanning, photogrammetry, pan-tilt platform, recycled aluminum, low cost.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
II.	Problema	2
III.	Justificación	3
IV.	Objetivos	4
IV-A.	Objetivo general	4
IV-B.	Objetivos específicos	4
V.	Marco teórico	5
V-A.	Digitalización tridimensional de objetos	5
V-B.	Principios de funcionamiento de un scanner 3D	6
V-C.	Sistema mecánico de dos grados de libertad	8
V-D.	Materiales para construcción de estructura de bajo costo	9
V-E.	Elección del aluminio para la construcción de las piezas mecánicas	10
V-F.	Propiedades físicas del aluminio	11
V-G.	Medición de iluminancia en sistemas de escaneo fotogramétrico	11
	V-G1. Concepto físico de iluminancia	12
	V-G2. Influencia de la iluminancia en el escaneo 3D	13
	V-G3. Sensores de iluminancia en aplicaciones experimentales	14
V-H.	Componentes electrónicos de control para plataforma de escaneo de dos grados libertad . .	14
	V-H1. Raspberry Pi 4B con Pi-Shield V1 pre-soldado	15
	V-H2. Arducam IMX519 de 16 Mpx	15
	V-H3. Motores paso a paso NEMA 17 (13 N · cm y 40 N · cm)	16
	V-H4. Controladores de motor paso a paso A4988	17
	V-H5. Fuente de alimentación de 12V/2.5A	17
	V-H6. Anillo de Luz LED	17
	V-H7. Elementos de fijación y ensamblaje (tornillería)	18
V-I.	Componentes electrónicos para el sensado de iluminancia	19
	V-I1. Principios de medición de iluminancia	19
	V-I2. Sensor BH1750	19
	V-I3. Módulo LCD 16x2 con interfaz I2C	20
	V-I4. Arduino Uno como controlador del subsistema	20
V-J.	Software de adquisición y reconstrucción 3D	21
V-K.	Evaluación de precisión y calidad del escaneo	21
	V-K1. Evaluación geométrica del modelo digital	22
	V-K2. Evaluación de la repetibilidad del escaneo	22
	V-K3. Evaluación de la calidad visual del modelo 3D	23
V-L.	Coefficiente de correlación de Pearson	24
	V-L1. Concepto de correlación estadística	24
	V-L2. Definición del coeficiente de correlación de Pearson	24
	V-L3. Expresión matemática del coeficiente de correlación	24
	V-L4. Interpretación del coeficiente de correlación	25
	V-L5. Aplicación del coeficiente de correlación en la evaluación del escaneo	26

VI.	Marco Metodológico	28
VI-A.	Diseño mecánico de plataforma de 2 grados de libertad	29
VI-B.	Rediseño de piezas mecánicas para posterior fundición	31
VI-B1.	Piezas originales del diseño inicial e inconvenientes detectados	32
VI-B2.	Principios de adaptación para fundición en moldes de arena	32
VI-B3.	Rediseño de la base principal	32
VI-B4.	Rediseño de la media luna y plataformas pan	33
VI-B5.	Rediseño de tapas frontal y posterior	33
VI-C.	Diseño y construcción de caja de acrílico para medición de iluminancia	35
VI-C1.	Diseño de la estructura de la caja	35
VI-C2.	Construcción y ensamblaje de la caja	36
VI-C3.	Sistema de iluminación y difusión de luz	40
VI-C4.	Diseño del sistema de sensado de iluminancia	41
VI-C5.	Implementación del sistema de medición	42
VI-C6.	Programación del sistema de adquisición de datos	43
VI-D.	Circuito electrónico para funcionamiento del scanner	45
VI-D1.	Alimentación y distribución de potencia	45
VI-D2.	Controladores de motores (drivers A4988) y conexión a Raspberry Pi	46
VI-D3.	Control del anillo LED y polarizador	46
VI-D4.	Conexión de la cámara externa y interfaz adicional	47
VI-E.	Circuito electrónico para funcionamiento de sistema de sensado de iluminancia	49
VI-E1.	Microcontrolador Arduino Uno	49
VI-E2.	Sensor de iluminancia BH1750	50
VI-E3.	Visualización de datos mediante LCD 16x2	50
VI-E4.	Comunicación I2C y distribución de conexiones	51
VI-F.	Fundición de aluminio	53
VI-F1.	Preparación de patrones impresos en 3D	53
VI-F2.	Creación y preparación de moldes de arena	54
VI-F3.	Proceso de fundición pieza por pieza	55
VI-F4.	Extracción, post-procesamiento y verificación de calidad	57
VI-G.	Ensamblaje e integración del sistema	59
VI-G1.	Preparación de piezas metálicas para ensamblaje	59
VI-G2.	Montaje mecánico de las piezas fundidas	59
VI-G3.	Integración de componentes electrónicos y ópticos	60
VI-G4.	Verificación de encaje, alineación y pruebas preliminares	61
VI-H.	Proceso de escaneo con plataforma de dos grados de libertad	62
VI-H1.	Configuración y operación del sistema de escaneo	63
VI-H2.	Procesamiento y reconstrucción del modelo 3D	65
VI-I.	Pruebas del prototipo	68
VI-I1.	Criterio de evaluación de la calidad del modelo 3D	68
VI-I2.	Pruebas de iluminancia	69
VI-I3.	Pruebas de cantidad de imágenes	71
VI-I4.	Análisis de correlación	72
VII.	Resultados	74
VII-A.	Prototipo final	74
VII-B.	Configuración final del escáner 3D	75
VII-C.	Resultados según iluminancia	76
VII-D.	Resultados según cantidad de fotos capturadas	81
VII-E.	Evaluación de la condición óptima de escaneo	84
VII-F.	Cálculo de la eficiencia del sistema	85

VIII. Cronograma	86
IX. Presupuesto	87
X. Conclusiones	88
XI. Recomendaciones	89
Referencias	90
Anexo A: Planos	95
Anexo B: OpenScan Firmware	112

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Ejemplo de escaneo 3D industrial, donde se muestra la captura y reconstrucción de piezas mecánicas. [26]	5
2.	Estructura robótica de dirección multiángulo para proyectos de escaneo o cámaras. [28]	6
3.	Movimientos de cámaras en superficies y ejes. [26]	7
4.	Estructura de dirección multiángulo para proyectos de escaneo o cámaras. [36]	8
5.	Representación conceptual de la iluminancia por unidad de área sobre una superficie. [45]	12
6.	Escaneo por fotogrametría donde se aplica iluminancia controlada. [46]	13
7.	Sensores de luz más característicos. [47]	14
8.	Placa Raspberry Pi 4 Model B, utilizada como unidad de procesamiento principal del sistema. [50] .	15
9.	Módulo de cámara Arducam IMX519 de 16 Mpx, compatible con la Raspberry Pi 4. [53]	16
10.	Motor paso a paso NEMA 17, usado para el control preciso de los movimientos mecánicos.[55] . . .	16
11.	Controlador A4988 para motores paso a paso, empleado en el control del movimiento del escáner. [57]	17
12.	Sensor BH1750 usado para sensar la iluminancia. [63]	19
13.	Pantalla LCD 16 x 2 con módulo I2C. [66]	20
14.	Controlador Arduino Uno. [68]	20
15.	Interfaz del servicio OpenScanCloud para reconstrucción tridimensional en la nube. [69]	21
16.	Comparación conceptual entre un modelo sólido CAD y un modelo mallado obtenido mediante escaneo 3D. [70]	22
17.	Resultados tras pruebas de escaneo realizadas repetidamente. [71]	23
18.	Gráficas de coeficiente de correlación de pearson. [75]	26
19.	Diseño preliminar de Base del scanner en SolidWorks.[81]	29
20.	Elaboración de Media Luna del scanner en SolidWorks.[81]	30
21.	Primer prototipo funcional. [81]	31
22.	Separación en dos partes de la media luna para una posterior elaboración de las piezas por medio de fundición.[81]	32
23.	Elaboración de nueva base en SolidWorks para realizar fundición.[81]	33
24.	Elaboración de media luna en SolidWorks para realizar fundición.[81]	33
25.	Elaboración de Tapa frontal en SolidWorks para realizar fundición.[81]	34
26.	Ensamble de piezas rediseñadas para la fundición.[81]	34
27.	Ensamblaje de caja de acrílico realizada en SolidWorks.[81]	35
28.	Aberturas para paso de cableado.[81]	36
29.	Lámina de acrílico a utilizar para construcción de caja.[81]	36
30.	Realización de los cortes para armado de caja.[81]	37
31.	Ensamblaje de láminas de acrílico con silicón. [81]	37
32.	Ensamblaje de acrílico.[81]	38
33.	Instalación de puerta abatible.[81]	38
34.	Instalación de manigueta en puerta abatible.[81]	39
35.	Implementación de luces leds para iluminación en escaneado.[81]	40
36.	Ubicación del sistema de iluminación y difusor dentro de la caja de acrílico.[81]	41
37.	Diseño en 3D realizado en SolidWorks.[81]	42
38.	Implementación de sistema de sensado.[81]	42
39.	LCD muestra valores de Iluminancia.[81]	43
40.	Primera parte de la programación del sistema de sensado de iluminancia.[81]	44
41.	Esquema eléctrico completo del sistema (diseñado en Fritzing).[81]	45
42.	Esquema eléctrico de la alimentación del sistema (diseñado en Fritzing).[81]	46
43.	Esquema eléctrico de conexión de los drivers de los motores (diseñado en Fritzing).[81]	46
44.	Esquema eléctrico del control del anillo de Luz (diseñado en Fritzing).[81]	47
45.	Esquema eléctrico de conexión del anillo de Luz (diseñado en Fritzing).[81]	47
46.	Esquema eléctrico de conexión de cámara externa (diseñado en Fritzing).[81]	47

47.	Esquema eléctrico de conexiones adicionales (diseñado en Fritzing).[81]	47
48.	Esquema en banco de pruebas Fritzing.[81]	48
49.	Esquema de conexión de sistema de sensado de iluminancia (diseñado en Fritzing). [81]	49
50.	Esquema de conexión del Arduino Uno para sistema de sensado (diseñado en Fritzing). [81]	49
51.	Esquema de conexión del sensor BH1750 (diseñado en Fritzing). [81]	50
52.	Esquema de conexión del módulo LCD 16x2 con interfaz I2C (diseñado en Fritzing). [81]	51
53.	Esquema de conexión del módulo I2c (Diseñado en Fritzing). [81]	52
54.	Montaje del sistema de sensado de iluminancia en protoboard (representación en Fritzing). [81] . . .	52
55.	Diagrama de flujo del proceso de fundición de aluminio reciclado para las piezas de la plataforma pan-tilt.[81]	53
56.	Piezas impresas en 3D para creación de moldes.[81]	54
57.	Preparación de moldes para fundición.[81]	54
58.	Horno caliente hasta alcanzar temperatura correcta.[81]	55
59.	Vertido de aluminio dentro de moldes.[81]	55
60.	Colocación de peso sobre moldes y piezas fundidas.[81]	56
61.	Preparación de moldes para fundición.[81]	56
62.	Sumergido de moldes y piezas en agua.[81]	57
63.	Extracción de piezas fundidas.[81]	57
64.	Eliminación de excesos de material.[81]	58
65.	Verificación de presencia de defectos.[81]	58
66.	Preparación de piezas de aluminio.[81]	59
67.	Ensamblaje e integración del sistema en físico.[81]	60
68.	Ensamblaje e integración de componentes mecánicos y electrónicos.[81]	60
69.	Verificación de encaje de piezas y funcionamiento.[81]	61
70.	Diagrama de flujo del proceso completo de escaneo y generación del modelo 3D.[81]	62
71.	Archivo tipo .CONF donde se deben de cambiar datos para conexión.[81]	63
72.	Interfaz web de OpenScan.[81]	63
73.	Panel de control de interfaz web OpenScan.[81]	64
74.	Captura secuencial de fotos a pieza.[81]	64
75.	Imágenes capturadas guardadas dentro de zip que fue descargado.[81]	65
76.	Inicialización de programa RealityScan2.0.1.[81]	65
77.	Ubicación en Workflow.[81]	65
78.	Uso de herramienta Folder.[81]	66
79.	Uso de herramienta Align images.[81]	66
80.	Uso de herramienta Normal Detail.[81]	66
81.	Uso de herramienta texture.[81]	67
82.	Objeto escaneado en formato 3D.[81]	67
83.	Ubicación de sensor de sistema de sensado de luminancia.[81]	69
84.	Ajuste de intensidad de luz de luces leds.[81]	69
85.	LCD muestra luminancia sensada.[81]	70
86.	Objeto escaneado en formato 3D luego de primera prueba.[81]	70
87.	Parametrización de cantidad de fotos a capturar.[81]	71
88.	Objeto escaneado en formato 3D luego de tercera prueba de toma de fotos.[81]	72
89.	Lámina de la vista explosionada del Scanner [81].	74
90.	Sistema de escaneo 3D final con identificación de sus principales componentes. [81]	75
91.	Relación entre iluminancia y calidad del escaneo.	79
92.	Relación entre cantidad de fotos capturadas y calidad del escaneo.	82
93.	Cronograma	86
94.	Lámina acotada de la Bancada del Scanner [81].	95
95.	Lámina acotada de tapa frontal del Scanner [81].	96

96.	Lámina acotada de la tapa posterior del Scanner [81].	97
97.	Lámina acotada del anillo/ media luna del Scanner [81].	98
98.	Lámina acotada del engranaje del Scanner [81].	99
99.	Lámina de la vista explosionada del Scanner [81].	100
100.	Lámina acotada de la tapa de la caja del LCD [81].	101
101.	Lámina acotada de la caja del LCD [81].	102
102.	Lámina de la vista explosionada de la caja del LCD [81].	103
103.	Lámina acotada de la caja de acrílico [81].	104
104.	Lámina acotada de puerta abatible de la caja de acrílico [81].	105
105.	Lámina acotada dl difuminador de luz de la caja de acrílico [81].	106
106.	Lámina acotada de parte 1 de la bisagra para la puerta abatible de la caja de acrílico [81].	107
107.	Lámina acotada del eje de la bisagra para la puerta abatible de la caja de acrílico [81].	108
108.	Lámina acotada de parte 2 de la bisagra para la puerta abatible de la caja de acrílico [81].	109
109.	Lámina acotada de la manigueta de la caja de acrílico [81].	110
110.	Lámina de la vista explosionada de la caja de acrílico [81].	111
111.	Interfaz web de OpenScan.[81]	112

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Comparación de materiales de bajo costo para estructuras mecánicas en proyectos DIY.	10
II.	Propiedades físicas del aluminio y su relevancia para la estructura.	11
III.	Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson (adaptado de [74]).	25
IV.	Escala de evaluación cualitativa de la calidad del modelo 3D.	68
V.	Resultados de iluminancia - Nivel 1	76
VI.	Resultados de iluminancia - Nivel 2	77
VII.	Resultados de iluminancia - Nivel 3	77
VIII.	Resultados de iluminancia - Nivel 4	78
IX.	Resultados de iluminancia - Nivel 5	78
X.	Relación entre iluminancia promedio y calificación	79
XI.	Cálculo de correlación entre iluminancia y calificación	80
XII.	Resultados de calificación según cantidad de fotos	81
XIII.	Cálculo de correlación entre cantidad de fotos y calificación	83
XIV.	Iteraciones de escaneo bajo condiciones óptimas (Nivel 5 de iluminancia y 300 capturas)	84
XV.	Presupuesto referencial del proyecto.	87

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el escaneo tridimensional adquiere una notable relevancia en campos como el diseño asistido por computadora, la ingeniería inversa y los procesos de manufactura. Esta tecnología permite transformar objetos físicos en modelos digitales con gran nivel de detalle, lo cual facilita el análisis, la modificación y la reproducción de componentes mecánicos [1]. Sin embargo, el acceso a estos sistemas aún se encuentra limitado para muchas instituciones educativas y técnicas que no cuentan con los recursos necesarios para adquirir equipos comerciales, los cuales suelen tener un costo elevado y requerir condiciones de uso específicas.

Según datos del Instituto Nacional de Evaluación Educativa (INEVAL) y el Ministerio de Educación del Ecuador, aproximadamente el 65 % de las instituciones educativas públicas del país operan con presupuestos clasificados como bajos o muy bajos (2023-2024), lo que representa alrededor de 8.500 de las 13.000 instituciones educativas formales a nivel nacional [2], [3]. Esta situación se agrava en colegios técnicos, universidades públicas y centros de formación profesional, donde la falta de acceso a herramientas tecnológicas avanzadas representa una barrera importante para la enseñanza práctica. Actualmente, los procesos de digitalización suelen ejecutarse de forma manual, lo que deriva en una excesiva carga de trabajo, falta de precisión y resultados que carecen de consistencia. Ante este panorama, surge la necesidad de implementar soluciones que reduzcan los costos operativos sin sacrificar la funcionalidad técnica del sistema.

Bajo este enfoque, la presente tesis propone el desarrollo de una plataforma mecánica de dos grados de libertad que funciona como un soporte automatizado para el escaneo 3D de piezas. Con el objetivo de minimizar los costos de fabricación, se plantea la construcción de dicha estructura utilizando aluminio reciclado proveniente de la fundición de latas de bebidas. Esta determinación no solo obedece a factores económicos, sino que también integra una filosofía de diseño sostenible. El sistema permite, por tanto, un control riguroso de la posición y orientación de la cámara, optimizando la cobertura y la fidelidad del modelo digital resultante.

En el diseño del sistema, se identifican retos técnicos críticos vinculados a la medición de la iluminación, puesto que este factor influye directamente en la calidad fotogramétrica. Aunque en una etapa inicial se considera el uso de sensores LDR (Light Dependent Resistor), estos presentan una respuesta no lineal y una sensibilidad limitada frente a las variantes lumínicas, lo que restringe su utilidad para obtener datos cuantitativos precisos [4]. Para resolver esta limitación, se adopta el sensor digital BH1750; este dispositivo mide la iluminancia directamente en lux, lo que facilita el establecimiento de entornos controlados y comparables durante las pruebas.

La cuantificación de la iluminancia es mucha relevancia en la fotogrametría, ya que la detección de puntos característicos en una imagen depende también de la estabilidad y uniformidad de la luz incidente [5]. Así, el uso de un sensor que proporcione valores objetivos en lux permite analizar con rigor cómo afecta la iluminación al desempeño del escáner. En última instancia, esta propuesta constituye una alternativa accesible y replicable, diseñada para potenciar el aprendizaje técnico en instituciones que operan con presupuestos limitados.

II. PROBLEMA

En el contexto actual, el escaneo tridimensional de piezas mecánicas se ha convertido en una herramienta clave en áreas como el diseño asistido por computadora, el control de calidad y la manufactura digital [6]. Sin embargo, su uso todavía presenta ciertas barreras: los equipos comerciales suelen ser costosos, requieren hardware especializado, espacios acondicionados y operadores con experiencia, lo que incrementa significativamente el valor de la mano de obra, sobre todo cuando el sistema no se emplea de manera constante. Esto hace que en muchos casos se opte por digitalizaciones manuales, un proceso más lento, con menor precisión y con mayor riesgo de errores humanos.

Según datos oficiales del Ministerio de Educación del Ecuador y del Instituto Nacional de Evaluación Educativa (INEVAL) correspondientes al período 2023-2024, aproximadamente el 65–70 % de las instituciones educativas públicas del país operan con presupuestos clasificados como bajos o muy bajos, lo que afecta a cerca de 8.500 de las 13.000 instituciones educativas formales a nivel nacional [2], [3]. Esta situación se agrava en colegios técnicos, universidades públicas y centros de formación profesional, donde la falta de acceso a herramientas tecnológicas avanzadas representa una barrera importante para la enseñanza práctica. Usualmente, los procesos de digitalización 3D deben realizarse manualmente, lo que implica una alta carga de trabajo, menor precisión y resultados no tan consistentes. Enfrentando esta realidad, resulta muy necesario buscar soluciones que ayuden a reducir los costos de implementación sin tener que comprometer la funcionalidad del sistema.

A causa de estas limitaciones, han surgido alternativas móviles, que integran cámaras RGB-D, técnicas de ajuste visual-inercial y fusión TSDF. Estos sistemas realizan reconstrucciones en tiempo real, pero aún presentan restricciones en cuanto a memoria, precisión en la medición de profundidad y dificultades para digitalizar piezas grandes o de geometría compleja [6]. Además, la falta de automatización en el movimiento del sensor sigue siendo un obstáculo importante. Incluso tecnologías más avanzadas, como la luz estructurada mediante triangulación por pulsos, alcanzan errores de reconstrucción muy bajos (del orden de 0,16 mm) y ofrecen un seguimiento preciso; sin embargo, requieren montaje y manipulación manual, lo que dificulta una operación verdaderamente ágil y eficiente [7], [8].

Los escaneos manuales evidencian que la carencia de soporte automatizado para desplazar el sensor produce modelos 3D imprecisos y poco reproducibles, reduciendo su calidad final [9], y en aplicaciones técnicas donde se requiere alta resolución, los algoritmos de optimización dependen de trayectorias estables del sensor; sin ellas, surgen artefactos geométricos y pérdida de detalles [10]. Incluso métodos avanzados como la proyección de franjas logran consistencia global sin necesidad de posicionamiento externo, pero requieren costosas configuraciones [11]. Finalmente, las técnicas que se destacan en la actualidad son de reconstrucción implícita con sensores múltiples y aprendizaje profundo incrementan la fidelidad 3D, pero solo bajo condiciones de adquisición rigurosas y entornos controlados, mismos que no se ajustan a los presupuestos restringidos [12].

Por lo tanto, existe una clara necesidad de una solución intermedia, automatizada elaborada con materiales económicos, que facilite el movimiento preciso del sensor, mejore la cobertura angular, reduzca la dependencia del operador y democratice el acceso al escaneo 3D en instituciones educativas y laboratorios con recursos limitados.

III. JUSTIFICACIÓN

El escaneo tridimensional a lo largo de su trayectoria se ha destacado en varias áreas de suma importancia en la ingeniería, sobre todo en mecánica industrial, ingeniería mecatrónica y carreras afines. Herramientas como los scanners 3D facilitan la digitalización de piezas, por lo que van ligadas directamente con el diseño. Debido a que su desarrollo se basa en elementos que no de fácil adquisición, por lo que es limitado para instituciones técnicas cuyos recursos económicos son bajos, ya que estos no solo se adquieren, estos sistemas necesitan un mantenimiento periódico y personal técnico capacitado para su correcto uso [13].

El uso de escáneres 3D ofrece una amplia gama de beneficios que han transformado la manera en que se desarrollan proyectos en distintos puntos de interés [14], [15]. Entre los más destacados está la posibilidad de capturar con precisión la forma y dimensiones de un objeto físico, lo que ahorra tiempo y reduce errores en comparación con métodos tradicionales de medición. El uso de estos dispositivos abre la puerta a la generación de réplicas con alta fidelidad, facilitando tanto el análisis de estructuras como la personalización de componentes específicos [16], [17]. Al integrar un mecanismo bidimensional en el flujo de escaneo, el sistema gana un valor añadido importante, sobre todo cuando el enfoque principal es la accesibilidad. No se trata solo de un ahorro económico; la clave está en que, al automatizar el movimiento mediante actuadores, se reduce drásticamente la necesidad de contar con operarios especializados. Cualquier usuario puede manejar el equipo de forma intuitiva, ya que el diseño permite desplazar el sensor o la pieza en dos ejes para capturar ángulos complejos sin recurrir a tecnologías de altísimo costo. Por esta razón, estudiar a fondo las propiedades del material estructural es un paso crítico: solo así se garantiza que el mecanismo responda correctamente mientras se mantienen bajos los costos de producción y operación [18].

Desde el punto de vista de la sostenibilidad y la rentabilidad, esta estrategia ataca directamente el problema de la generación de residuos. El aluminio destaca aquí como un recurso valioso, pues su capacidad de reciclarse de forma indefinida sin degradar sus propiedades mecánicas ni su calidad, lo convierte en un pilar de la economía circular [19], [20]. Más allá del objeto técnico final, emplear la fundición casera de latas llega a aportar un valor pedagógico inmenso; transforma la teoría sobre materiales y metalurgia en una experiencia práctica y tangible dentro del aula, reforzando así el compromiso con el medio ambiente.

La plataforma propuesta permitiría mover el sensor de forma controlada y automática, lo que ayudaría a mantener la precisión de las trayectorias y a evitar errores geométricos que suelen presentarse en el escaneo manual [21]. Al reducir la dependencia de operadores especializados y eliminar la necesidad de condicionantes ambientales costosos [22].

IV. OBJETIVOS

IV-A. Objetivo general

Desarrollar una plataforma mecánica de dos grados de libertad para la asistencia en el proceso de digitalización 3D de piezas mecánicas mediante el control automatizado de la posición y orientación de una cámara de escaneo.

IV-B. Objetivos específicos

- Diseñar un mecanismo de dos grados de libertad utilizando material de bajo costo que garantice un buen desempeño estructural.
- Implementar sensores y actuadores para el control de posición y orientación de una cámara de escaneo 3D.
- Validar el funcionamiento del sistema mediante pruebas de escaneo de objetos de distintas dimensiones.

V. MARCO TEÓRICO

V-A. Digitalización tridimensional de objetos

La digitalización tridimensional ha ido evolucionando progresivamente para convertirse en una herramienta muy importante en las diferentes áreas de la ingeniería, la manufactura y la educación técnica, misma que ha permitido transformar diversos objetos físicos en modelos digitales que poseen muchos detalles que ayudarán en el diseño y análisis de objetos. Como indican Haleem y Khan [23], el escaneo 3D facilita procesos de ingeniería inversa, control dimensional y manufactura digital, promoviendo los principios de la Industria 4.0.

Particularmente, los sistemas de escaneo de bajo costo han abierto puertas para aquellas instituciones de recursos limitados, en ese sentido, un estudio acerca de las soluciones de mapeo 3D de bajo costo resalta la importancia de que estos sistemas sean asequibles [24].

En años recientes, especialmente hacia 2025, la integración de inteligencia artificial en la fotogrametría ha democratizado aún más el escaneo 3D, permitiendo reconstrucciones de alta precisión con dispositivos cotidianos como smartphones o cámaras DSLR, sin necesidad de hardware especializado costoso. Hoy en día, el campo de la fotogrametría vive una transformación gracias a la inteligencia artificial, donde alcanza precisiones submilimétricas incluso en piezas de dimensiones reducidas. El éxito de estos avances reside en algoritmos capaces de pulir la extracción de puntos clave y reconstruir mallas, lo que democratiza el uso de esta tecnología en espacios educativos donde el presupuesto suele ser un obstáculo [25].

En esta misma línea, herramientas accesibles como Polycam, Luma AI, Kiri Engine o el software de código abierto Meshroom han dado un salto cualitativo. Estas aplicaciones ya permiten procesar capturas realizadas desde dispositivos móviles mediante el uso de IA. Esto encaja con la realidad de entornos como Ecuador, donde la limitación económica para adquirir equipos industriales obliga a buscar alternativas de bajo costo [25].

En ese contexto, el presente proyecto se enfoca en apoyar, mediante resultados, la igualdad en el acceso al escaneo 3D por medio de un dispositivo mecánico de bajo costo que sea automatizado.



Figura 1. Ejemplo de escaneo 3D industrial, donde se muestra la captura y reconstrucción de piezas mecánicas. [26]

V-B. Principios de funcionamiento de un scanner 3D

Para capturar un objeto en 3D, se utilizan múltiples sensores o cámaras que recopilan una gran cantidad de vistas del objeto; estas se combinan para generar mallas tridimensionales o nubes de puntos dentro de una interfaz programada para cumplir con este objetivo.

En el caso de sistemas de bajo costo como el propuesto en esta tesis, el método principal es la fotogrametría (o Structure from Motion - SfM), que reconstruye modelos 3D a partir de fotografías tomadas desde diferentes ángulos con una cámara convencional (como la Arducam IMX519 utilizada aquí). La fotogrametría se basa en principios geométricos de perspectiva y triangulación: al analizar imágenes superpuestas (overlap frontal y lateral $>70-80\%$), el software identifica puntos clave comunes (features) en múltiples fotos, estima la posición y orientación de la cámara (pose) y calcula las coordenadas 3D de los puntos mediante ajuste de haces (bundle adjustment) [27]. El proceso típico incluye:

1. **Captura de imágenes:** Tomar cientos de fotos con alta superposición, iluminación uniforme y ángulos variados para evitar oclusiones.
2. **Extracción de características:** Algoritmos detectan puntos distintivos (e.g., SIFT o ORB).
3. **Reconstrucción inicial (SfM):** Estimación simultánea de la estructura de la escena y el movimiento de la cámara.
4. **Densificación (Multi-View Stereo - MVS):** Generación de nube de puntos densa.
5. **Reconstrucción de malla y texturizado:** Creación de superficie triangulada con texturas realistas.



Figura 2. Estructura robótica de dirección multiángulo para proyectos de escaneo o cámaras. [28]

Un aspecto importante en este tipo de sistemas es que se deben tomar en cuenta diferentes factores, como la repetición controlada de los ángulos de cámara y una correcta iluminación hacia el objeto a escanear. La superposición insuficiente genera errores en la reconstrucción, mientras que la iluminación inadecuada (sombras o reflejos) introduce ruido y artefactos, especialmente en superficies metálicas o brillantes comunes en piezas

mecánicas. Tomando en cuenta estos factores, una plataforma motorizada que controle la posición y orientación de la cámara será una buena opción para mejorar considerablemente la calidad del modelo digital, ya que asegura trayectorias estables, repetición angular precisa y minimiza errores humanos [29].

Comparado con otros métodos:

- **Luz estructurada:** Proyecta patrones de luz (franja o puntos) y usa triangulación para medir profundidad; ofrece alta precisión (submilimétrica en objetos pequeños) y buena captura de detalles/texturas, pero requiere hardware especializado y entornos controlados, con rango limitado (~ 5 m) [30].
- **Escaneo láser (triangulación o TOF):** Alta precisión (1–5 mm) y robustez en superficies grandes o industriales, pero sensible a reflectividad y más costoso [31].

La fotogrametría destaca en aplicaciones low-cost por su accesibilidad (solo cámara + software libre), capacidad para objetos grandes y texturas ricas, aunque su precisión típica (~ 0.1 – 0.5 mm en condiciones ideales) depende más de la calidad de las imágenes y el procesamiento que de hardware dedicado. En este proyecto, la automatización con 2 grados de libertad mitiga limitaciones como el movimiento manual, mejorando la consistencia y reduciendo artefactos geométricos [32].

Este tipo de mecanismos nos permiten controlar dos movimientos independientes, como, por ejemplo, una rotación de manera horizontal (pan) y una rotación de manera vertical (tilt). Estos se refieren a movimientos de cámaras o de mecanismos, este tipo de movimientos se usan comúnmente en cámaras de seguridad, ya que estas necesitan realizar una inspección generalizada del área a la que tienen acceso, por lo que realizan este tipo de movimientos para tener una visibilidad más amplia del lugar.

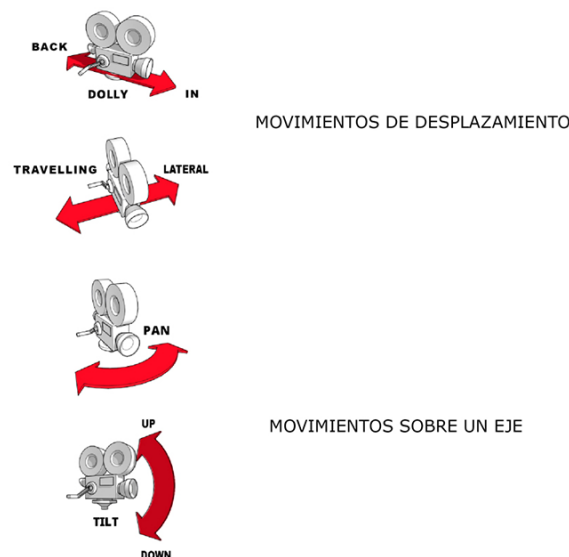


Figura 3. Movimientos de cámaras en superficies y ejes. [26]

V-C. Sistema mecánico de dos grados de libertad

Los mecanismos de dos grados de libertad (2 GDL) permiten el control independiente de dos ejes de movimiento; es decir, cada eje opera en una dirección distinta al otro, ejecutándose de manera autónoma sin interferir en la trayectoria del contrario. Este tipo de mecanismos aporta precisión y mayor detalle a las imágenes obtenidas en un escaneo 3D, ya que permiten capturar fotografías desde ángulos que no serían accesibles con un solo grado de libertad, mejorando la cobertura angular y reduciendo oclusiones y artefactos en la reconstrucción fotogramétrica [33].

En aplicaciones de escaneo 3D y fotogrametría, los mecanismos pan-tilt (panorámico-inclinación) son los más comunes para 2 GDL. El movimiento *pan* corresponde a una rotación horizontal alrededor del eje vertical (ángulo ϕ), mientras que el *tilt* es una rotación vertical alrededor del eje horizontal (ángulo θ). La posición de la cámara en coordenadas esféricas, asumiendo una distancia fija r desde el centro de rotación al objeto (o viceversa), se describe mediante las siguientes ecuaciones de transformación:

$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi, \quad z = r \cos \theta \quad (1)$$

donde:

- θ es el ángulo de tilt (inclinación, típicamente -90° a $+90^\circ$),
- ϕ es el ángulo de pan (rotación horizontal, 0° a 360°),
- (x, y, z) representan la coordenada cartesiana relativa del punto de vista de la cámara

Estas ecuaciones permiten modelar la trayectoria de la cámara y garantizar una distribución uniforme de vistas para la fotogrametría (SfM), minimizando huecos en la nube de puntos [34]. En sistemas DIY de bajo costo, como el propuesto aquí, los motores paso a paso NEMA 17 proporcionan la precisión angular necesaria (resolución típica de $0,9^\circ$ o mejor con microstepping), siendo ideales para cargas ligeras como una cámara y su soporte [35].

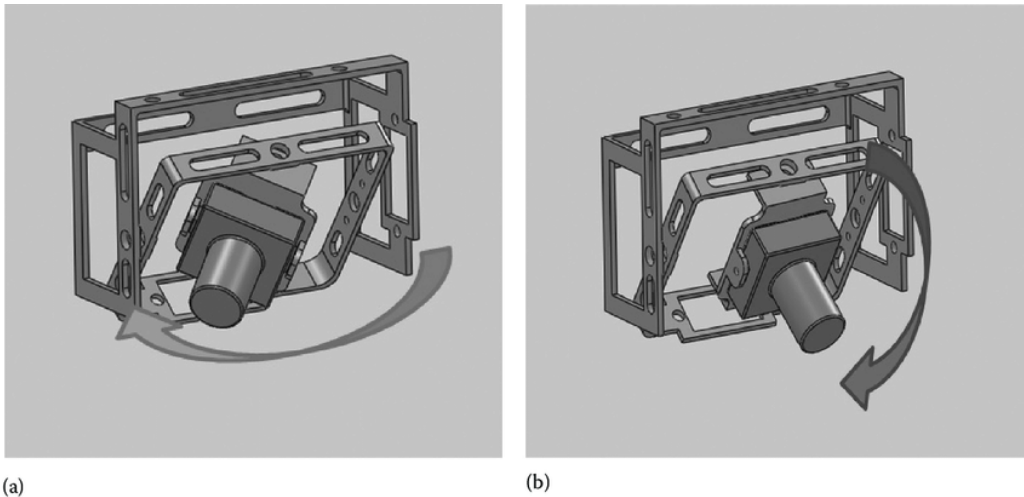


Figura 4. Estructura de dirección multiángulo para proyectos de escaneo o cámaras. [36]

Este tipo de mecanismos se emplea comúnmente en cámaras de seguridad, estabilizadores y plataformas de escaneo 3D low-cost, ya que permiten una inspección generalizada y control preciso sin requerir actuadores más complejos. En el contexto de este proyecto, el mecanismo de 2 GDL automatizado con motores NEMA 17 asegura trayectorias repetibles y estables, esenciales para reducir errores geométricos en la reconstrucción 3D de piezas mecánicas, especialmente cuando se combina con software como OpenScan [37].

V-D. Materiales para construcción de estructura de bajo costo

La selección del material es primordial cuando se trata de reducir costos y no comprometer la funcionalidad del sistema, ya que estos deben ser accesibles económicamente y, al mismo tiempo, cumplir con diferentes especificaciones requeridas para que el mecanismo funcione correctamente junto con los otros componentes. Esto implica que todos los elementos sean compatibles entre sí; por ejemplo, el peso del material debe ser soportado por los motores sin exceder su capacidad de torque, y la rigidez estructural debe garantizar estabilidad durante el movimiento para evitar vibraciones que afecten la calidad del escaneo 3D [38].

En proyectos de mecatrónica de bajo costo, como el presente, se priorizan materiales reciclables o de fácil adquisición local, tales como aluminio reciclado, PLA impreso en 3D o acrílico, siempre evaluando su compatibilidad con actuadores como los motores NEMA 17 (con torque de $13 \text{ N} \cdot \text{cm}$ y $40 \text{ N} \cdot \text{cm}$).

Un análisis comparativo breve de alternativas revela que el aluminio reciclado destaca por su bajo costo (alrededor de 8-18 dólares por kg en Ecuador), alta relación resistencia-peso y reciclabilidad infinita, en contraste con el PLA (más frágil bajo cargas dinámicas) o el acero (más pesado y costoso) [39]. La elección debe considerar factores como la densidad (para minimizar inercia en movimientos) y la conductividad térmica (para disipar calor generado por fricción), asegurando que el material no interfiera con la precisión angular requerida en fotogrametría.

Adicionalmente, en contextos educativos y de sostenibilidad, el uso de materiales reciclados promueve una economía circular, reduciendo el impacto ambiental. Por instancia, fundir aluminio de latas permite crear estructuras personalizadas a bajo costo, aunque requiere manejo de impurezas para mantener propiedades mecánicas [40].

En proyectos de mecatrónica de bajo costo y en contextos educativos con recursos limitados (como en Ecuador), se priorizan materiales reciclables o de fácil adquisición local. Las principales opciones consideradas son:

- Aluminio reciclado (proveniente de latas de bebidas o chatarra).
- Plásticos impresos en 3D (PLA o PETG).
- Acrílico o PVC.
- Acero de bajo carbono (aunque más pesado y costoso).

La Tabla I presenta una comparación resumida de estos materiales, enfocada en criterios relevantes para la plataforma propuesta.

Tabla I
COMPARACIÓN DE MATERIALES DE BAJO COSTO PARA ESTRUCTURAS MECÁNICAS EN PROYECTOS DIY.

Material	Costo aprox. (USD/kg)	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Ventajas principales
Aluminio reciclado	8–18	2.70	69	Alta reciclabilidad, excelente relación resistencia–peso, fácilmente fundible de forma casera
PLA (impreso 3D)	20–30	1.24	3–4	Prototipado rápido y sencillo, peso muy bajo, aunque presenta fragilidad bajo cargas elevadas
Acrílico	15–25	1.19	3	Alta transparencia, fácil mecanizado y corte, pero limitada resistencia al impacto
Acero bajo carbono	1–3	7.85	200	Muy alta resistencia mecánica, bajo costo, pero elevado peso y difícil fundición casera

El aluminio reciclado se destaca como la opción más adecuada para esta aplicación: su densidad moderada asegura que los motores puedan manejar la estructura sin sobrecarga, su módulo de Young de 69 GPa proporciona la rigidez necesaria para minimizar vibraciones durante el barrido angular, y su proceso de fundición casera permite fabricar piezas personalizadas a muy bajo costo. Además, contribuye a la economía circular al reutilizar residuos, promoviendo prácticas sostenibles en entornos educativos.

La elección correcta del material no solo reduce significativamente los costos de fabricación, sino que también garantiza compatibilidad con actuadores, sensores y el proceso de ensamblaje, evitando problemas como fatiga prematura, deformaciones excesivas o inestabilidad durante la operación.

V-E. Elección del aluminio para la construcción de las piezas mecánicas

El aluminio se presenta como uno de los materiales más accesibles en el mercado ecuatoriano, disponible en múltiples formas (chatarra, láminas, perfiles, latas usadas) y con especificaciones físicas que cumplen plenamente los requisitos para una estructura mecánica de bajo costo y buen desempeño en aplicaciones de escaneo 3D [41].

Sus principales ventajas para este proyecto son:

- Bajo costo relativo y alta disponibilidad local mediante reciclaje.
- Excelente relación resistencia-peso, lo que permite construir piezas ligeras pero rígidas.
- Facilidad de fundición casera o mecanizado con herramientas básicas.
- Reciclabilidad infinita sin pérdida significativa de propiedades mecánicas.
- Buena maquinabilidad y compatibilidad con tornillos, pernos y uniones estándar.

El costo del aluminio en Ecuador varía según su forma, pureza y origen (nuevo o reciclado). A continuación se presentan precios referenciales actualizados (2025), obtenidos de recicladores y mercados locales [42]:

- Compra de aluminio (chatarra): \$8.80 por kilogramo
- Compra de latas de aluminio: \$18.00 por kilogramo
- Compra de alambre de aluminio (AAC): \$13.60 por kilogramo

- Compra de cable de aluminio con forro: \$10.60 por kilogramo

Estos valores son indicativos y pueden fluctuar según la región, la cantidad comprada y el proveedor. Se recomienda contactar recicladores locales confiables en Guayaquil o Manta para obtener cotizaciones reales y asegurar material limpio (sin exceso de pintura o lacas que compliquen la fundición).

V-F. Propiedades físicas del aluminio

El aluminio es un material muy utilizado y su aplicación se realiza en diferentes áreas de la industria gracias a sus propias características. A continuación, se presentan algunas de sus propiedades físicas:

La Tabla II resume las propiedades físicas más relevantes del aluminio, comparadas con su idoneidad para la plataforma propuesta.

Tabla II
PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO Y SU RELEVANCIA PARA LA ESTRUCTURA.

Propiedad	Valor típico	Relevancia para el proyecto
Densidad	2.70 g/cm ³ (2700 kg/m ³)	Bajo peso, evita sobrecarga en los motores NEMA 17 durante el movimiento
Punto de fusión	660 °C	Permite fundición casera con hornos básicos y accesibles
Punto de ebullición	2467 °C	Garantiza seguridad en procesos térmicos de fundición
Conductividad eléctrica	59–62 % IACS	Facilita disipación de calor en zonas cercanas a componentes eléctricos
Conductividad térmica	205 W/(m·K)	Ayuda a disipar el calor generado por fricción o motores
Módulo de Young	69 GPa	Proporciona rigidez suficiente para minimizar vibraciones en el mecanismo
Resistencia a la tracción	70–700 MPa (según aleación)	Soporta cargas dinámicas generadas por los movimientos pan-tilt

Estas especificaciones demuestran que el aluminio es uno de los materiales más favorables para la construcción de la estructura del mecanismo de escaneo tridimensional, ya que posee las especificaciones físicas adecuadas como también por su bajo precio. Estos factores aseguran un correcto funcionamiento, cumpliendo con el objetivo de abaratar costos y que este sea más accesible.

V-G. Medición de iluminancia en sistemas de escaneo fotogramétrico

La medición de iluminancia constituye un muy importante en sistemas de captura de imágenes utilizados para reconstrucción tridimensional. En aplicaciones basadas en fotogrametría, la calidad de las imágenes adquiridas depende directamente de las condiciones de iluminación presentes durante la captura, ya que estas influyen en el contraste, la exposición y la detección de puntos característicos necesarios para la reconstrucción geométrica [5].

La iluminancia, expresada en lux (lx), permite cuantificar de manera objetiva la cantidad de luz incidente sobre la superficie del objeto escaneado. A diferencia de descripciones cualitativas de iluminación, el uso de una magnitud fotométrica estandarizada facilita el control experimental y la comparación entre distintas configuraciones de captura. En el campo de la ingeniería y la visión artificial, trabajar con mediciones en lux garantiza que las pruebas sean verdaderamente replicables. La intención es cerrar el margen a cualquier fluctuación lumínica que pueda confundir a los algoritmos de reconstrucción, y así asegurar que el sistema se comporte de la misma manera en cada toma de datos [43].

La evidencia técnica muestra que una iluminación inestable suele traducirse en errores al detectar rasgos visuales. Estos fallos impactan de lleno en la calidad de la nube de puntos y, por lo tanto también tendrán impacto en la fidelidad geométrica del modelo tridimensional que se vaya obtener [44]. Por este motivo, el monitoreo constante de la iluminancia se convierte en un requisito de diseño para evaluar con rigor qué tan preciso es el rendimiento de un escáner 3D.

V-G1. Concepto físico de iluminancia: La iluminancia es la magnitud fotométrica que cuantifica el flujo luminoso que recibe una superficie. Dentro del Sistema Internacional de Unidades (SI), esta medida se define en lux (lx); técnicamente, un lux representa un lumen repartido de forma uniforme sobre un área de un metro cuadrado. La relación matemática se expresa de la siguiente manera:

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2 \quad (2)$$

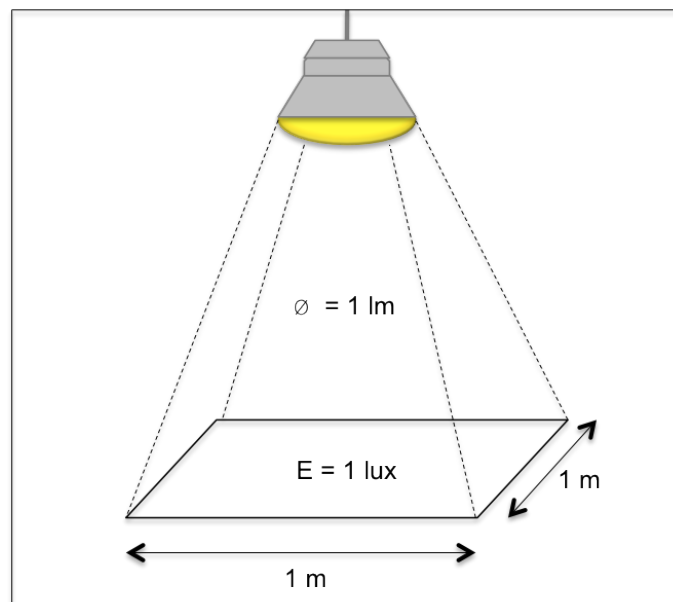


Figura 5. Representación conceptual de la iluminancia por unidad de área sobre una superficie. [45]

A diferencia de términos coloquiales como “luminosidad”, que carecen de rigor técnico, la iluminancia permite cuantificar con precisión el estado lumínico de un entorno. Este parámetro se rige por variables específicas, como lo es la intensidad de la fuente, la distancia respecto al objeto y el ángulo de incidencia de la luz sobre la superficie.

En la captura de imágenes, la iluminancia determina cuánta luz alcanza efectivamente al sensor de la cámara. Este flujo incide en la exposición, la nitidez de los detalles y la aparición de ruido digital. Por ello, operar con valores medibles en lux otorga un control técnico sobre la escena y asegura que las comparaciones entre distintos montajes experimentales sean consistentes.

V-G2. Influencia de la iluminancia en el escaneo 3D: Dentro de la fotogrametría, el éxito de la reconstrucción está estrechamente ligado a cómo se ilumine la pieza durante las tomas. La iluminancia dicta la capacidad del software para reconocer y vincular puntos de interés entre fotografías, procesos que sostienen toda la estructura geométrica del modelo [5].

Si los niveles de lux son insuficientes, las capturas sufren de subexposición y pérdida de información crítica, lo que llega a entorpecer la detección de rasgos visuales. En el extremo opuesto, un exceso de luz provoca saturación o brillos especulares comunes en materiales metálicos que distorsionan la geometría final. Ambas situaciones derivan en nubes de puntos erráticas o modelos que resultan deformados [43].

Mantener una iluminación controlada se traduce en imágenes homogéneas y con una definición superior, lo que dota de estabilidad al flujo fotogramétrico. Así, registrar la iluminancia en lux simplifica el análisis de las variables de captura y ayuda a encontrar el punto óptimo para maximizar la calidad del escaneo.



Figura 6. Escaneo por fotogrametría donde se aplica iluminancia controlada. [46]

V-G3. Sensores de iluminancia en aplicaciones experimentales: La cuantificación de la iluminancia se apoya en diversas tecnologías de detección, cuya selección se define según el rigor de la medida y la naturaleza del proyecto. En el mercado destacan las fotorresistencias (LDR), los fotodiodos y los sensores digitales. Cada dispositivo ofrece un desempeño distinto en términos de sensibilidad, linealidad y complejidad al integrarlos en circuitos electrónicos.

Los LDR predominan en aplicaciones sencillas por su precio reducido y facilidad de uso; no obstante, su comportamiento es errático debido a una respuesta no lineal que se ve alterada por la temperatura y el espectro de luz. Un inconveniente técnico de estos sensores es que no proporcionan lecturas directas en lux, lo que restringe su utilidad en investigaciones que exigen datos cuantitativos y comparaciones que sean objetivas [4].

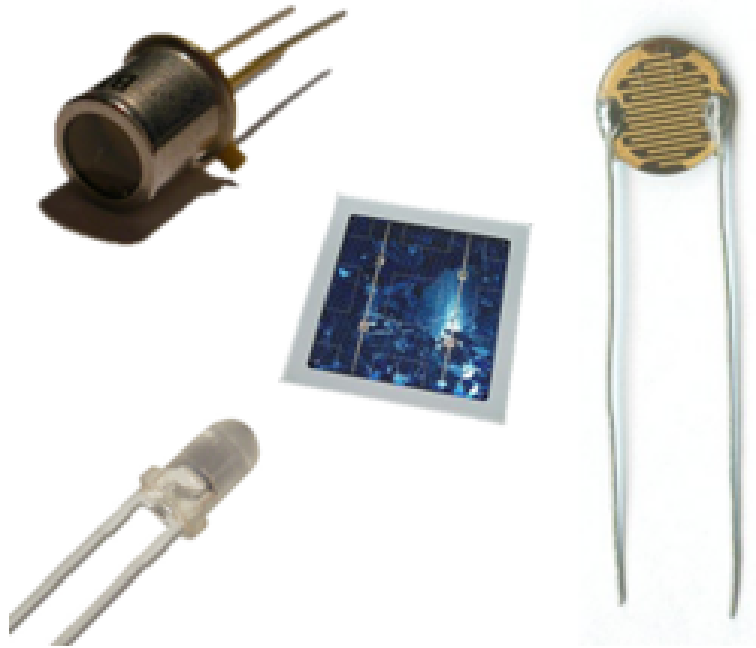


Figura 7. Sensores de luz más característicos. [47]

Como alternativa, los sensores digitales incorporan etapas de acondicionamiento y conversión interna para entregar datos directamente en unidades de iluminancia. Esta arquitectura simplifica su despliegue en montajes experimentales. Esta categoría de sensores cobra relevancia cuando se necesita fijar entornos lumínicos controlados para evaluar cómo afectan a la captura de imágenes o a la reconstrucción 3D. Al generar registros cuantificables y repetibles, estos dispositivos elevan la confiabilidad de los datos recolectados durante las pruebas.

V-H. Componentes electrónicos de control para plataforma de escaneo de dos grados libertad

Para que el escaneo se dé de manera correcta, este mecanismo necesita de elementos electrónicos para que el proyecto cumpla con su objetivo que es escanear. Este estará integrado de controladores, sensores, motores y fuentes de alimentación, mismos que cumplirán cada uno su propósito dentro del mecanismo de escaneo, siendo cada uno de estos una parte fundamental del sistema.

V-H1. Raspberry Pi 4B con Pi-Shield V1 pre-soldado: Las aplicaciones de escaneo 3D requieren de un alto procesamiento, por lo que la placa Raspberry Pi 4B es de las mejores opciones para este tipo de proyecto. Esta es una computadora que ofrece un alto rendimiento, por lo que es capaz de procesar grandes cantidades de información [48].

Sus características clave incluyen:

- Conectividad: Gigabit Ethernet, Wi-Fi dual-band (2.4/5 GHz), Bluetooth 5.0, 2 puertos USB 3.0 y 2 USB 2.0.
- Salidas de video: 2 × micro-HDMI (hasta 4Kp60).
- GPIO: 40 pines compatibles con generaciones anteriores.
- Consumo: 5 V DC vía USB-C (mínimo 3 A recomendado).

El Pi-Shield V1 pre-soldado simplifica enormemente la conexión de motores, controladores y sensores, reduciendo errores de cableado y tiempo de ensamblaje. En proyectos de escaneo 3D low-cost, esta placa actúa como un mini-PC, capaz de ejecutar scripts en Python (con bibliotecas como RPi.GPIO y OpenCV) para orquestar el movimiento pan-tilt y la captura sincronizada [49].



Figura 8. Placa Raspberry Pi 4 Model B, utilizada como unidad de procesamiento principal del sistema. [50]

Esta computadora se encuentra equipada con un Broadcom BCM SoC, un SoC de cuatro núcleos Cortex-A72 a 1.8 GHz y soporta hasta 8 GB de RAM LPDDR4-3200 SDRAM. En resumen, se podría decir que actúa como un mini-cerebro con 4 “sub-cerebros” (núcleos) que trabajan a 1.8 GHz, y puede usar hasta 8 GB de memoria rápida para manejar programas complejos como los necesarios para escaneo 3D.

Que esta placa posea el Pi-Shield V1 pre-soldado se considera una gran ventaja ya que simplifica la conexión de la Raspberry Pi con otros componentes del escáner.

V-H2. Arducam IMX519 de 16 Mpx: El Arducam IMX519 es un módulo de cámara que utiliza el sensor Sony IMX519, el cual posee una alta resolución de 16 MP y enfoque automatizado. Este sensor permite capturar imágenes detalladas y precisas, logrando de esta manera la reconstrucción tridimensional de los objetos [51].

Especificaciones principales:

- Resolución: 16 MP (4656 × 3496), hasta 4656×3496@10 fps o 1080p@60 fps.
- Ángulo de visión: 80° (lente f/1.75, EFL 4.28 mm).
- Enfoque: Automático, rango 10 cm a infinito.

- Formato: RAW10/8, COMP8; interfaz CSI-2 (2 lanes).
- Compatibilidad: Raspberry Pi 5/4B/3B+/Zero 2W vía ribbon posee cable de 15-50 cm.

Dentro del flujo fotogramétrico, trabajar con altas resoluciones mitiga la aparición de ruido y artefactos durante la reconstrucción tridimensional. Por su parte, el sistema de enfoque automático (*autofocus*) garantiza nitidez en objetos situados a distintas profundidades sin necesidad de ajustes manuales. Al integrar este componente con un anillo LED y un filtro polarizador, se logra neutralizar los destellos en superficies metálicas o pulidas [52].

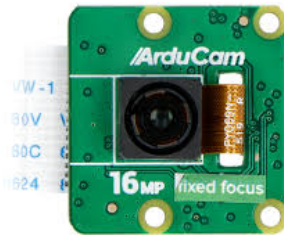


Figura 9. Módulo de cámara Arducam IMX519 de 16 Mpx, compatible con la Raspberry Pi 4. [53]

Este dispositivo se integra de forma nativa con la Raspberry Pi mediante una interfaz de alta velocidad, lo que agiliza el flujo de datos hacia el procesador. El módulo incorpora una óptica con un ángulo de visión de 122° , característica que facilita la captura de piezas de mayor volumen sin obligar a desplazamientos adicionales de la cámara.

V-H3. Motores paso a paso NEMA 17 ($13 \text{ N} \cdot \text{cm}$ y $40 \text{ N} \cdot \text{cm}$): Este tipo de motores son ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren mucha precisión en el movimiento, ya que pueden mover cargas con un control exacto [54]. El modelo de $13 \text{ N} \cdot \text{cm}$ es adecuado para movimientos más ligeros y rápidos, mientras que el modelo $40 \text{ N} \cdot \text{cm}$ proporciona un par motor mayor, necesario para realizar movimientos pesados o que requieran mayor control de la fuerza.

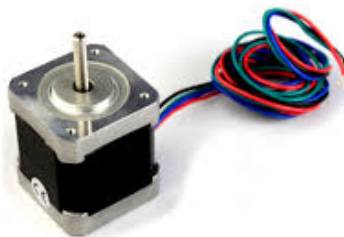


Figura 10. Motor paso a paso NEMA 17, usado para el control preciso de los movimientos mecánicos.[55]

V-H4. Controladores de motor paso a paso A4988: El A4988 es un controlador de motor paso a paso que permite el control eficiente de motores bipolares. Este posee características de protección contra sobrecorriente y sobrecalentamiento. Que este controlador se encuentre integrado con la Raspberry Pi provoca un control preciso y muy seguro de los motores ejecutando movimientos exactos durante el momento del escaneo. Este controlador opera con un voltaje de entrada de 8V a 35V y puede dar hasta 1A por fase [56].



Figura 11. Controlador A4988 para motores paso a paso, empleado en el control del movimiento del escáner. [57]

V-H5. Fuente de alimentación de 12V/2.5A: Especificaciones típicas y consideraciones clave:

- Voltaje de salida: 12 V DC regulado ($\pm 5\%$ de tolerancia).
- Corriente máxima: 2.5 A (suficiente para dos NEMA 17 a 1–1.5 A cada uno + LED).
- Conector: Jack DC 5.5 $\times$ 2.1 mm (estándar en la mayoría de drivers y anillos LED).
- Protección: Sobrecorriente, cortocircuito, sobrevoltaje y polaridad inversa (en modelos de calidad).
- Eficiencia: 80 % (recomendado switching mode para menor calentamiento).

En este proyecto, la fuente garantiza torque constante en los motores durante movimientos prolongados, evitando pérdida de pasos o vibraciones que generarían artefactos geométricos en la fotogrametría. Una caída de voltaje por debajo de 10 V podría reducir el torque hasta un 30–40 %, afectando la repetibilidad angular y la superposición de imágenes. Por ello, se selecciona una fuente con margen de corriente (al menos 20–30 % superior al consumo estimado) y con conector europeo compatible con enchufes locales en Ecuador [27].

Además, se recomienda ubicarla fuera del bastidor principal para disipar calor y evitar interferencias electromagnéticas con la Raspberry Pi y la cámara. En entornos educativos, su bajo costo (USD 16) y disponibilidad en tiendas locales la convierten en una solución práctica y segura [58].

V-H6. Anillo de Luz LED: Este será el encargado de proporcionar una iluminación uniforme y sin sombras, factores que serán muy necesarios para un correcto escaneo y que los resultados sean óptimos. El diseño que posee permite realizar una distribución homogénea de la luz, disminuyendo los reflejos y sombras que puedan interferir en el proceso.

El anillo de luz LED es un componente crítico para lograr una iluminación uniforme y sin sombras en todo el proceso de captura fotogramétrica. Su diseño circular se coloca alrededor de la lente de la cámara Arducam IMX519, distribuyendo luz homogénea desde múltiples ángulos y minimizando reflejos, glare y zonas subexpuestas, especialmente en piezas mecánicas con superficies metálicas o brillantes [29].

Parámetros técnicos y funcionalidad del sistema lumínico:

- **Dimensiones:** Diámetro interno de 50–70 mm, compatible con la óptica de 122° de la IMX519.
- **Configuración de LEDs:** Entre 48 y 64 unidades con temperatura de color blanco frío (5500–6500 K) para asegurar la neutralidad cromática.
- **Control de flujo:** Intensidad regulable mediante potenciómetro o modulación por ancho de pulso (PWM) desde la Raspberry Pi.
- **Suministro eléctrico:** Operación a 12 V DC, integrada a la fuente principal de 12 V/2.5 A.
- **Gestión de luz:** Incorporación de un difusor para mitigar brillo y sombras marcadas.

Dentro del flujo fotogramétrico, una iluminación deficiente suele introducir ruido en la nube de puntos y fallos en la fidelidad de las texturas. Al integrar el anillo LED con un filtro polarizador cruzado como uno fabricado mediante impresión 3D, se logra neutralizar los reflejos especulares en materiales metálicos y polímeros. [29].

Su consumo moderado (5-10 W) y su durabilidad estimada en 50,000 horas favorecen su aplicación en entornos educativos de uso intensivo. En el marco de este proyecto, su función es estabilizar las condiciones lumínicas, aislando así el proceso de las variaciones del entorno ambiental para poder garantizar resultados repetibles.

V-H7. Elementos de fijación y ensamblaje (tornillería): La integración de elementos como tornillos, tuercas y pernos no es un detalle menor; estos componentes proporcionan la rigidez del conjunto, la alineación de las piezas y la disipación de vibraciones parásitas. Si el ajuste no es milimétrico, cualquier pequeña holgura termina por amplificarse durante las maniobras de rotación e inclinación (*pan-tilt*). Este fenómeno introduce errores angulares que arruinan la superposición de las tomas y degradan el modelo 3D final [30].

Especificaciones de los elementos de sujeción empleados:

- **Tornillos de nailon M2:** Seleccionados para la cámara y el Pi-Shield por sus propiedades aislantes y ligereza.
- **Tornillos metálicos M3 y M4:** Destinados a la estructura de aluminio y soporte de motores.
- **Tuercas hexagonales e insertos para aluminio:** Facilitan un ensamblaje modular sin comprometer la integridad del material reciclado.
- **Pernos y espaciadores:** Definen las distancias operativas entre ejes y minimizan la fricción interna.
- **Arandelas de presión y planas:** Utilizadas para prevenir el desajuste causado por el movimiento mecánico.

En total, se estima un set de 100–150 piezas variadas, con un costo aproximado de USD 25. Su correcta selección y torque de apriete (usando destornilladores de precisión) aseguran:

- Alineación de ejes pan y tilt dentro de ± 0.1 –0.2 mm.
- Ausencia de juego mecánico que cause backlash en los motores.
- Amortiguación de vibraciones transmitidas desde los steppers.

En proyectos DIY y educativos, estas piezas suelen subestimarse, pero su calidad y cantidad adecuada son clave para lograr repetibilidad y durabilidad del sistema. Se recomienda usar grados 8.8 o superiores en tornillos metálicos para soportar cargas dinámicas sin deformación [59].

V-I. Componentes electrónicos para el sensado de iluminancia

La iluminancia, entendida como el flujo luminoso incidente por unidad de superficie y medida en lux, representa un parámetro crítico en procesos de fotogrametría y reconstrucción 3D [60]. Una iluminación inadecuada genera reflejos, sombras, pérdida de detalle o artefactos geométricos que afectan la precisión de la nube de puntos y la calidad de la malla final [61]. Por esta razón, se incorpora un subsistema dedicado a la medición de iluminancia que permite registrar cuantitativamente las condiciones lumínicas durante los escaneos y correlacionarlas con los resultados obtenidos.

V-II. Principios de medición de iluminancia: La medición de iluminancia se realiza mediante sensores foto-eléctricos que convierten la intensidad luminosa en una señal eléctrica proporcional. Los sensores digitales modernos, basados en fotodiodos con amplificación integrada y conversión analógico-digital, ofrecen ventajas significativas respecto a los sensores analógicos tradicionales: mayor linealidad, amplio rango dinámico y comunicación digital directa [62]. Estos dispositivos permiten registrar valores de lux en tiempo real sin necesidad de calibración externa frecuente, lo que los hace ideales para entornos educativos y experimentales donde se requiere reproducibilidad y bajo costo.

V-I2. Sensor BH1750: El sensor BH1750 es un dispositivo digital para luz ambiente desarrollado por ROHM Semiconductor, este es capaz de medir iluminancia en un rango de 1 a 65535 lx con resolución configurable hasta 1 lx [62]. Opera mediante interfaz I2C, lo que facilita su integración con microcontroladores como Arduino o Raspberry Pi. El sensor incorpora un fotodiodo de silicio con filtro espectral que aproxima la respuesta del ojo humano, lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones donde la percepción visual resulta relevante, como en fotogrametría. En este proyecto, el BH1750 se configura en modo de alta resolución para obtener mediciones precisas en el rango de iluminación utilizado durante los escaneos.



Figura 12. Sensor BH1750 usado para sensar la iluminancia. [63]

V-13. *Módulo LCD 16x2 con interfaz I2C*: La visualización de los datos se realiza mediante un display LCD de 16x2 caracteres con controlador HD44780 y adaptador I2C (PCF8574). Esta interfaz reduce el número de pines necesarios de 11 a solo 2 (SDA y SCL), lo que simplifica el cableado y el montaje [64]. El módulo permite mostrar en tiempo real el valor de iluminancia en lux, junto con información adicional como el estado del sistema o mensajes de error. La librería LiquidCrystalI2C, ampliamente utilizada en proyectos Arduino, gestiona la comunicación y la actualización del display [65].

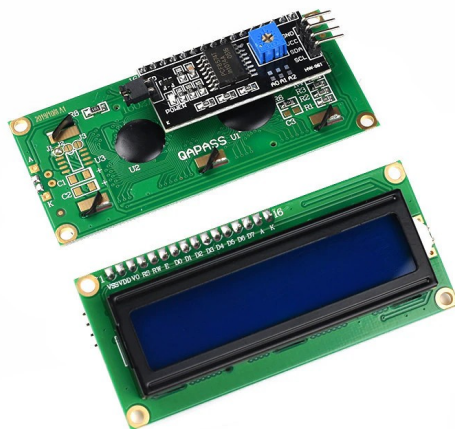


Figura 13. Pantalla LCD 16 x 2 con módulo I2C. [66]

V-14. *Arduino Uno como controlador del subsistema*: El microcontrolador Arduino Uno, basado en el ATmega328P, se emplea como unidad central del subsistema de sensado. Este dispositivo cuenta con 14 pines digitales, 6 entradas analógicas, interfaz I2C nativa y puerto serial, lo que lo hace ideal para leer el sensor BH1750, controlar el LCD y registrar datos [67]. Se desarrolla un firmware simple que inicializa el sensor, realiza lecturas periódicas, aplica un filtro de media móvil para reducir ruido y muestra los resultados en el LCD. La alimentación se toma de una fuente USB o de 5 V externa, asegurando autonomía respecto al sistema principal.

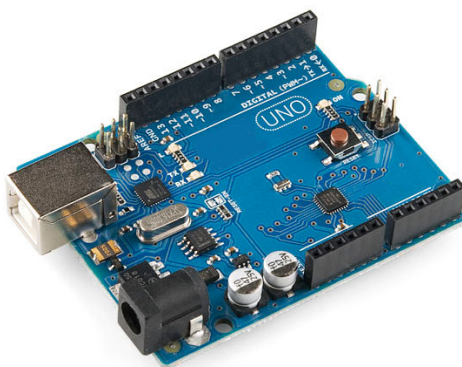


Figura 14. Controlador Arduino Uno. [68]

El subsistema encargado de medir la iluminancia se integra para obtener datos cuantitativos de la escena, lo que ayuda a entender cómo influyen los niveles de lux en la nitidez y calidad de las capturas. Más que un simple añadido, esta herramienta sirve para evaluar el desempeño del prototipo con objetividad y para determinar qué rangos de luz funcionan mejor según el acabado de cada pieza mecánica.

V-J. *Software de adquisición y reconstrucción 3D*

El flujo de trabajo en escaneo por fotogrametría suele dividirse en dos fases bien diferenciadas: la captura de datos visuales y la posterior generación del modelo digital. Según el diseño del sistema, estas tareas pueden recaer en un único software o dividirse entre herramientas autónomas para así maximizar la eficiencia en cada paso.

En este proyecto, la plataforma OpenScan asume el rol de centro de control. A través de su interfaz web, se automatiza el disparo de la cámara y se coordina el movimiento del mecanismo *pan-tilt*. Desde este entorno, se gestionan los parámetros de captura y se organizan las ráfagas de imágenes directamente en el almacenamiento del sistema, simplificando la logística de los datos recolectados.

Para la etapa de reconstrucción tridimensional, el procesamiento de las imágenes queda a cargo de RealityScan 2.0.1. Este software aplica los algoritmos de fotogrametría necesarios para transformar las fotografías en nubes de puntos, mallas poligonales y texturas finales. Optar por este esquema, delega el procesamiento pesado a una herramienta especializada, manteniendo la etapa de adquisición ligera y ágil.

La combinación de estas herramientas fortalece la viabilidad económica del prototipo. Al integrar soluciones de código abierto o de acceso gratuito, se evita la dependencia de licencias comerciales costosas que suelen ser el mayor freno en proyectos de este tipo.

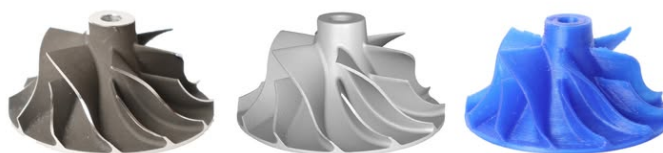


Figura 15. Interfaz del servicio OpenScanCloud para reconstrucción tridimensional en la nube. [69]

Apoyarse en software libre no es solo una cuestión de presupuesto; es una estrategia que elimina las barreras de entrada en laboratorios educativos o instituciones con recursos limitados, donde el costo de una plataforma integral sería prohibitivo.

V-K. *Evaluación de precisión y calidad del escaneo*

Validar los sistemas de escaneo tridimensional basados en fotogrametría exige definir parámetros que midan la fidelidad de los modelos digitales. La calidad de un objeto 3D se asocia con su simetría geométrica, la continuidad

de sus superficies, la solidez estructural y la veracidad con la que representa al componente original [5].

En escenarios donde no existe acceso a equipos de metrología industrial, la inspección se realiza a través de criterios cualitativos bajo observación metódica. Se examinan indicadores como la aparición de artefactos, la integridad de la malla y la nitidez en detalles geométricos específicos [43]. Este método se ajusta a proyectos educativos o de bajo presupuesto, donde el éxito reside en la funcionalidad y la lógica visual del resultado.

La precisión del escaneo se liga estrechamente a factores de la captura, como la luz que recibe el objeto o el volumen de fotografías procesadas. La literatura técnica indica que una iluminancia adecuada favorece la nitidez de las texturas y el reconocimiento de puntos característicos. Asimismo, una cobertura angular amplia mediante múltiples tomas dota de mayor estabilidad a la geometría del modelo [5].

V-K1. Evaluación geométrica del modelo digital: Bajo un enfoque teórico, la exactitud geométrica en fotogrametría es el nivel de concordancia entre la pieza física y su réplica digital. Esta paridad no solo busca conservar las proporciones generales, sino lograr una reconstrucción nítida de rasgos como planos, aristas y curvaturas complejas [43].

En tareas de ingeniería inversa, la coherencia de la geometría dicta la utilidad real del archivo obtenido. Una malla sin interrupciones, libre de deformaciones macroscópicas y con bordes bien definidos, demuestra un proceso de digitalización consistente desde el punto de vista técnico.

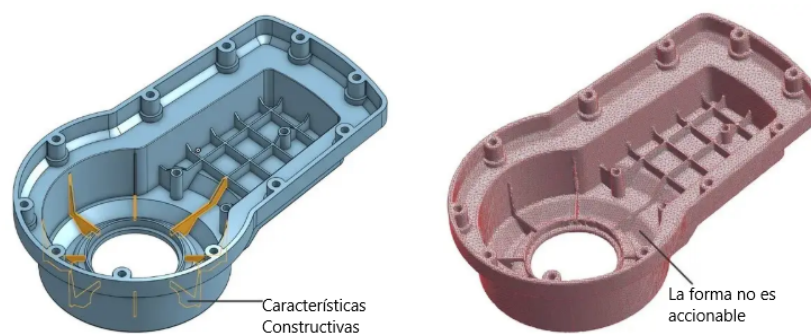


Figura 16. Comparación conceptual entre un modelo sólido CAD y un modelo mallado obtenido mediante escaneo 3D. [70]

V-K2. Evaluación de la repetibilidad del escaneo: La repetibilidad define la capacidad del sistema para entregar resultados constantes al ejecutar el proceso bajo las mismas condiciones iniciales [44]. En este ámbito, dicha propiedad depende de la firmeza del soporte de captura, la precisión en la ruta de movimiento y la superposición uniforme entre cada imagen.

Diversas investigaciones confirman que automatizar el posicionamiento con plataformas motorizadas elimina el error del operador humano y asegura reconstrucciones comparables entre sí [5]. Por tanto, la repetibilidad es un estándar de confianza para el uso del escáner en entornos técnicos.



Figura 17. Resultados tras pruebas de escaneo realizadas repetidamente. [71]

V-K3. Evaluación de la calidad visual del modelo 3D: Más allá de la métrica geométrica, la apariencia visual del modelo es un factor de peso en la validación de la fotogrametría. En teoría, este criterio se vincula con la nitidez y fluidez con que el software interpreta la forma, lo que facilita la lectura de la geometría y el acabado superficial [5].

Los textos especializados señalan que la calidad visual se analiza mediante la ausencia de huecos, la baja presencia de ruido y la alineación de las texturas sobre la superficie. Los defectos en estos puntos suelen nacer de una iluminación deficiente, destellos indeseados o falta de solapamiento entre las vistas capturadas [43].

En estudios experimentales orientados a evaluar el desempeño de sistemas de escaneo, la calidad visual puede estructurarse mediante escalas ordinales que permitan clasificar el resultado en distintos niveles de desempeño. Este tipo de aproximación facilita el análisis comparativo entre configuraciones de captura y proporciona un criterio sistemático para valorar la coherencia global del modelo reconstruido.

En sistemas orientados a aplicaciones educativas y de bajo costo, donde no se requieren niveles de precisión metrológica estricta, una malla continua, estable y visualmente coherente constituye un indicador válido de un proceso de digitalización correctamente ejecutado [72].

V-L. Coeficiente de correlación de Pearson

V-L1. *Concepto de correlación estadística:* En el análisis de datos experimentales es frecuente estudiar la relación existente entre dos variables, con el fin de determinar si los cambios en una de ellas se encuentran asociados a variaciones en la otra. Este tipo de relación se conoce como correlación estadística y constituye una herramienta de mucha importancia en el análisis de fenómenos donde intervienen múltiples factores.

Es preciso subrayar que la correlación describe únicamente el grado en que dos variables fluctúan de forma conjunta; esto no supone, bajo ninguna circunstancia, un vínculo de causa y efecto. Se define una correlación positiva cuando ambos parámetros crecen o decrecen al mismo tiempo. Por el contrario, si el aumento de uno coincide con la disminución del otro, se trata de una correlación negativa. Ante la ausencia de un patrón de comportamiento definido entre las métricas, la correlación se cataloga como nula [73].

En la práctica de la ingeniería y el trabajo experimental, este análisis sirve para detectar tendencias y medir el impacto de variables específicas sobre un fenómeno. Tal herramienta cobra valor durante la interpretación de datos en ensayos de laboratorio, pues ayuda a comprender cómo ciertos factores inciden en el rendimiento global del sistema diseñado.

V-L2. *Definición del coeficiente de correlación de Pearson:* En el abanico de métricas estadísticas, el coeficiente de correlación de Pearson destaca al evaluar el vínculo lineal entre dos variables cuantitativas. Esta medida estima la dirección de la relación y su intensidad mediante un valor numérico que sintetiza el nivel de asociación entre ambos conjuntos de datos.

El coeficiente, que se identifica con la letra r , oscila en un rango de -1 a 1 . Una cifra cercana a 1 denota una conexión lineal positiva sólida, mientras que un valor próximo a -1 manifiesta una dependencia lineal negativa marcada. Si el coeficiente tiende a cero, el nexo lineal entre las variables resulta débil o nulo [74].

Cabe precisar que esta métrica se limita a nexos de tipo lineal. Por lo tanto, su capacidad de detección falla ante asociaciones no lineales, incluso si existe una dependencia real entre las variables. Debido a esta característica, su lectura requiere un análisis previo de la naturaleza de los datos y del entorno experimental.

V-L3. *Expresión matemática del coeficiente de correlación:* El cálculo del coeficiente de Pearson parte de la covarianza entre dos variables, la cual se normaliza con el producto de sus desviaciones estándar. Tal formulación entrega una cifra adimensional que mide la relación lineal sin que las unidades de medida originales afecten el resultado final.

La expresión matemática del coeficiente de correlación se presenta en la ecuación 3:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

donde x_i y y_i representan los valores individuales de las variables analizadas, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ corresponden a sus medias aritméticas, y n es el número total de observaciones. El numerador de la ecuación define la covarianza entre las variables, mientras que el denominador normaliza el resultado con las desviaciones estándar. Este procedimiento asegura que el coeficiente permanezca dentro del intervalo $[-1, 1]$ [74].

Tal formulación evalúa con objetividad la relación entre dos conjuntos de datos. Su uso es frecuente en análisis experimentales destinados a detectar tendencias o asociaciones entre variables medidas.

V-L4. Interpretación del coeficiente de correlación: Tras el cálculo del coeficiente de Pearson, el siguiente paso consiste en analizar su valor para comprender el vínculo entre las variables. El índice r identifica la dirección y la intensidad de la relación lineal; un signo positivo señala una relación directa, mientras que uno negativo refleja una proporción inversa.

La magnitud del coeficiente dicta la fuerza de la asociación. Las cifras cercanas a cero evidencian una relación lineal débil o nula, mientras que los valores próximos a 1 o -1 representan una conexión sólida. No obstante, la lectura de estos datos carece de un carácter absoluto, pues estos datos pueden cambiar según el entorno del estudio y la naturaleza de la información recolectada [74].

En términos generales, la intensidad de la correlación se clasifica mediante rangos de referencia de uso común en estadística aplicada [74], tal como detalla la Tabla III.

Tabla III
INTERPRETACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (ADAPTADO DE [74]).

Valor de $ r $	Interpretación
0.00 – 0.19	Correlación muy débil
0.20 – 0.39	Correlación débil
0.40 – 0.59	Correlación moderada
0.60 – 0.79	Correlación fuerte
0.80 – 1.00	Correlación muy fuerte

Cabe destacar que el coeficiente de correlación mide únicamente vínculos lineales. Por lo tanto, un valor bajo de r no supone la ausencia total de relación entre las variables, sino que el comportamiento entre ellas podría seguir una lógica no lineal. Debido a esta particularidad, el análisis del coeficiente requiere el apoyo de una inspección visual de los datos y del entorno experimental.

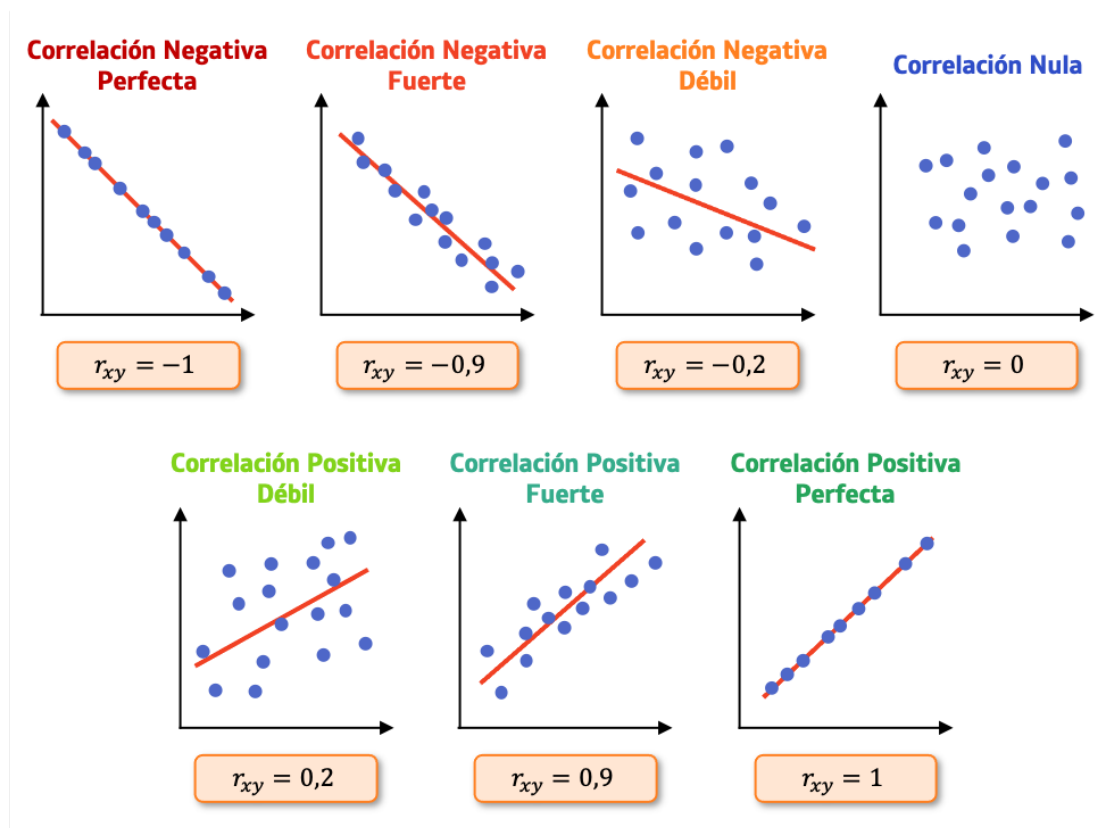


Figura 18. Gráficas de coeficiente de correlación de pearson. [75]

V-L5. *Aplicación del coeficiente de correlación en la evaluación del escaneo*: El análisis de los sistemas de escaneo tridimensional exige una valoración sobre cómo impactan distintos parámetros en la calidad del producto final. Variables como la iluminancia del entorno o el volumen de imágenes recolectadas durante el proceso inciden de forma directa en el nivel de detalle, la integridad de la malla y la fidelidad geométrica de la reconstrucción. Bajo esta premisa, el uso de herramientas estadísticas otorga objetividad al examen de los vínculos entre estas variables y el éxito del escaneo.

El coeficiente de correlación de Pearson es un recurso técnico idóneo para este fin, pues cuantifica el nivel de asociación lineal entre dos métricas cuantitativas. Su empleo cobra sentido al trabajar con conjuntos de datos que provienen de diversas condiciones de ensayo, lo que ayuda a detectar tendencias y a determinar la existencia de un nexo real entre los factores en estudio [74].

En la práctica fotogramétrica, la calidad del modelo 3D se juzga a través de la continuidad superficial, la ausencia de ruido o la nitidez de los rasgos. Estos criterios se traducen a una escala de valoración numérica, método que dota al resultado de un valor cuantificable para su posterior tratamiento estadístico. Así, es posible contrastar el desempeño del sistema bajo distintos escenarios de luz o esquemas de captura de forma rigurosa.

Este análisis estadístico ayuda a establecer si hay una correspondencia entre la iluminancia (medida en lux) y la calidad del modelo, así como entre el número de fotografías y el producto obtenido. A través del índice r , se define si el cambio en una variable se vincula con variaciones en el acabado de la pieza digital, lo cual ofrece un sustento sólido para la interpretación de los hallazgos en el laboratorio.

En definitiva, el coeficiente de Pearson se integra como un recurso que agiliza el estudio de datos en sistemas de escaneo 3D. Su función principal es la detección de tendencias y la comparación de montajes, lo que otorga validez a las conclusiones que se extraen de cada ensayo realizado.

VI. MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo detalla la ruta de trabajo para el desarrollo de la plataforma mecánica de dos grados de libertad, diseñada para asistir en la digitalización tridimensional de piezas mediante fotogrametría de bajo costo. La estrategia se basa en principios de ingeniería mecatrónica aplicada y combina aspectos mecánicos, electrónicos y de control bajo un proceso iterativo. El enfoque prioriza la sostenibilidad y es adaptable a entornos con presupuestos limitados, como instituciones educativas y técnicas en Ecuador.

La decisión de adoptar una metodología experimental responde a la naturaleza del proyecto: el diseño, la fabricación y la validación de un prototipo funcional que resuelva problemas reales de accesibilidad tecnológica [76]. En proyectos mecatrónicos, este esquema facilita la integración de disciplinas desde la idea inicial hasta la puesta en marcha física, lo que provoca que se reduzcan riesgos y optimiza el uso de recursos [77]. Esta dinámica, inspirada en modelos como la norma VDI 2206 para sistemas mecatrónicos [78], permite ajustes constantes entre fases. Esta flexibilidad cobra valor en prototipos que emplean materiales reciclados, donde las tolerancias finales se definen a partir de ensayos reales.

El proceso se organiza en etapas secuenciales con ciclos de mejora para así poder asegurar que cada avance cumpla con los objetivos del proyecto. Se apuesta por la sostenibilidad a través del uso de aluminio reciclado mediante fundición artesanal; esta técnica disminuye los costos e introduce principios de economía circular en el desarrollo técnico [79]. Asimismo, el plan de trabajo hace hincapié en la replicabilidad, por lo que cada paso cuenta con documentación detallada para su reproducción en otros contextos educativos, lo que ayuda a fomentar un acceso abierto a este tipo de herramientas de escaneo 3D.

El proyecto tiene un carácter aplicado que busca la solución práctica ante el escaso acceso a escáneres 3D comerciales en el país. El desarrollo sigue una secuencia de ajustes constantes basados en simulaciones y pruebas de ensamblaje. En este flujo se integran el diseño mecánico, la selección de electrónica y la evaluación del desempeño. Todo el conjunto se mantiene bajo una filosofía de bajo costo y fabricación local para así mitigar la dependencia de importaciones.

Esta estructura se alinea con las recomendaciones para proyectos de ingeniería en Latinoamérica, donde existe un balance entre el rigor técnico, la viabilidad económica y el impacto social [80]. En las siguientes secciones se detalla el enfoque general del estudio, el diagrama de flujo y la secuencia operativa, con el fin de poder proporcionar una guía clara del proceso seguido.

En definitiva, este marco justifica las decisiones técnicas y prepara el terreno para la interpretación de los resultados. El texto demuestra cómo un prototipo de bajo costo puede aportar mejoras sustanciales en procesos educativos y técnicos en entornos con recursos escasos.

VI-A. Diseño mecánico de plataforma de 2 grados de libertad

El diseño de la plataforma *pan-tilt* de dos grados de libertad marcó el inicio del proyecto. En esta fase se definió la estructura base para el control automatizado de la posición y orientación de la cámara Arducam IMX519. El modelado se ejecutó en el software SolidWorks, seleccionado por su precisión paramétrica y la facilidad para generar archivos aptos para impresión 3D en PLA. Esta elección logró que se agilizaran las pruebas y las validaciones de geometría antes de proceder con la fabricación en aluminio reciclado. La meta principal fue obtener un mecanismo robusto, que sea ligero y modular, con la rigidez necesaria para sostener los componentes sin vibraciones que degraden la calidad de las capturas fotogramétricas.

La base estructural cuenta con un diseño a medida para alojar los elementos del sistema: los motores NEMA 17 (un modelo de $13\text{ N} \cdot \text{cm}$ para el eje *pan* y otro de $40\text{ N} \cdot \text{cm}$ para el *tilt*), las placas de control (controladores A4988 y Raspberry Pi 4B con Pi-Shield) y los soportes de la fuente de alimentación de $12\text{ V} / 2.5\text{ A}$. Se aplicaron dimensiones exactas para así poder asegurar un ensamblaje preciso, que posea orificios roscados, ranuras de sujeción y nervaduras internas que ayudarán con correcta alineación del modelo en PLA. La geometría de la base posee una forma rectangular con mayor espesor en las zonas de carga crítica para equilibrar resistencia y ligereza. Además, el diseño integra canales para la gestión de cables, lo que ayuda a evitar obstrucciones durante el movimiento. Este planteamiento inicial sirvió para verificar los diferentes ajustes de los componentes que no poseen holguras y facilitó la detección temprana de posibles conflictos geométricos que en un futuro puedan comprometer la funcionalidad del scanner.

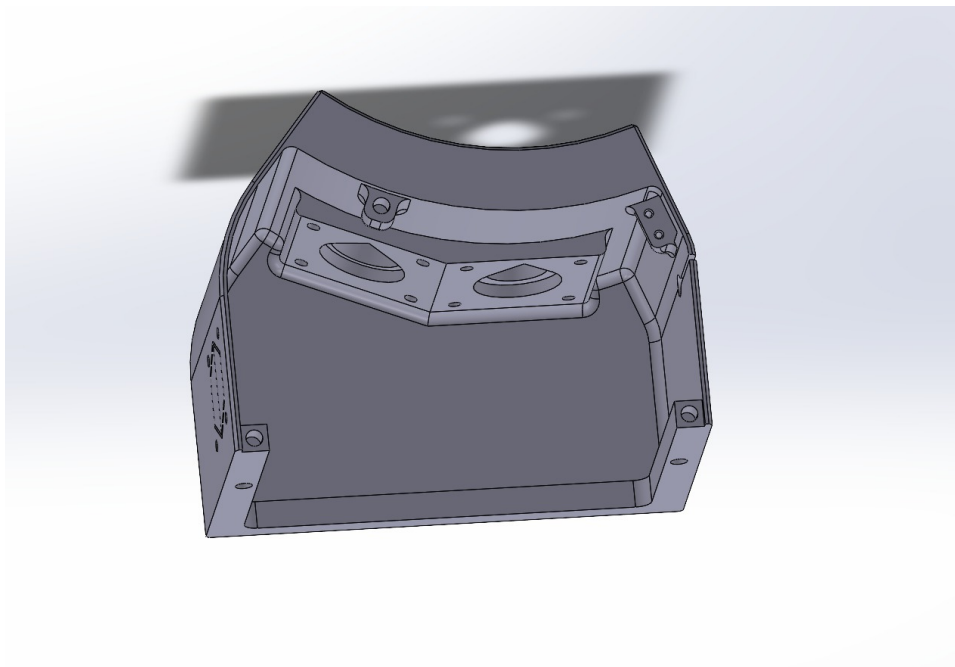


Figura 19. Diseño preliminar de Base del scanner en SolidWorks.[81]

Durante el proceso de optimización, el espesor se incrementó de 1 mm a 2 mm (un aumento aproximado del 15%) para reducir la flexión bajo cargas dinámicas. Asimismo, se redistribuyó el material mediante la incorporación de tres refuerzos radiales, lo que permitió mejorar la rigidez estructural sin aumentar significativamente el peso

total (incremento inferior al 12 %). La zona central destinada al pivote se reforzó aumentando su diámetro en un 20 % para mejorar la estabilidad del soporte de la cámara. Esta pieza se imprimió en PLA junto con la base para validar su funcionamiento y ajustar el perfil de los dientes en caso de detectarse juego o desgaste prematuro.

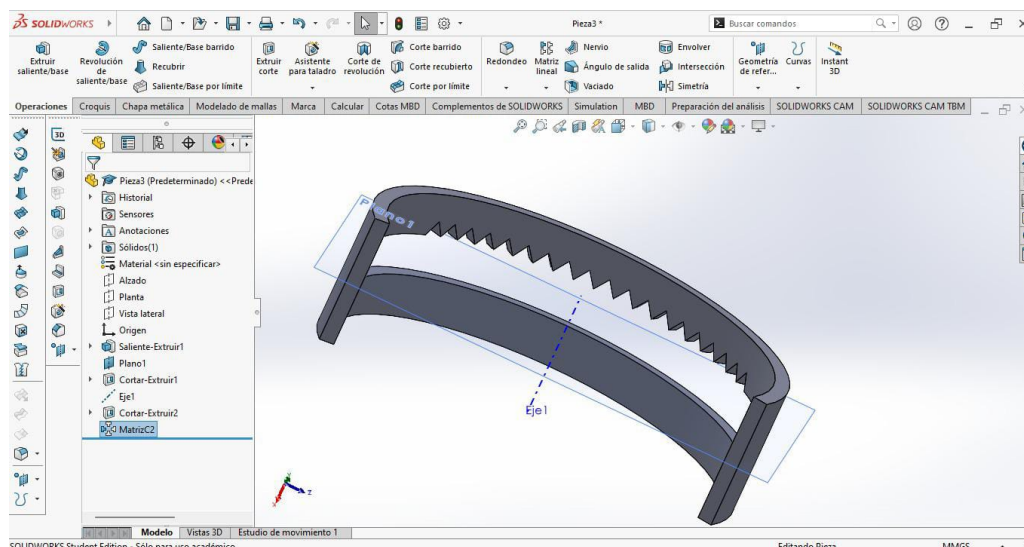


Figura 20. Elaboración de Media Luna del scanner en SolidWorks.[81]

La plataforma giratoria para el eje pan (rotación horizontal) se elaboró como una base circular conectada directamente al motor correspondiente, permitiendo así un giro completo de 360° con estabilidad. Se diseñaron tres versiones iterativas de esta plataforma: la primera con diámetro inicial y refuerzos mínimos; la segunda con mayor diámetro y soportes adicionales para reducir vibraciones que puedan existir durante la impresión en PLA; y la tercera con optimizaciones finales en el acoplamiento al motor y en la superficie de apoyo para la cámara y el anillo LED. Cada iteración se fabricó en PLA para un ensamblaje temporal y se sometió a pruebas manuales con el fin de verificar la fluidez del movimiento y que este no posea errores de construcción, ausencia de holguras y correcta alineación óptica. Estos ensayos preliminares sirvieron para poder corregir tolerancias, equilibrar también el centro de masa y asegurar que la plataforma siempre mantuviera la cámara centrada durante su traslación de arriba hacia abajo. De esta forma, se evitaron desviaciones que pudieran perjudicar la superposición de tomas en el proceso de fotogrametría.

La impresión 3D de los componentes (base, soporte de media luna y plataformas de giro) funcionó como una validación geométrica y operativa del diseño realizado preliminarmente. Para este proceso se empleó una impresora FDM estándar con filamento PLA, bajo una configuración de relleno del 30–40 %, altura de capa de 0.2 mm y soportes mínimos para un desmoldeo sencillo. Tras la impresión, el ensamblaje se realizó con tornillería estándar para posteriormente ejecutar pruebas de movimiento, tanto manuales como con los motores a baja velocidad. Estos ensayos lograron confirmar que la estabilidad del conjunto, el rango de maniobra y la integración con la cámara y el anillo, fue realizada de manera óptima.

Durante estas pruebas se detectaron y subsanaron inconvenientes menores, como por ejemplo los juegos mecánicos en los ejes. Estos ajustes se trasladaron al modelo en SolidWorks antes de iniciar la etapa de fundición. Esta

metodología iterativa con polímeros resultó económica y ágil en las fases iniciales, pues confirmó que el mecanismo logra cumplir con los requisitos de estabilidad y precisión para la captura multiángulo.

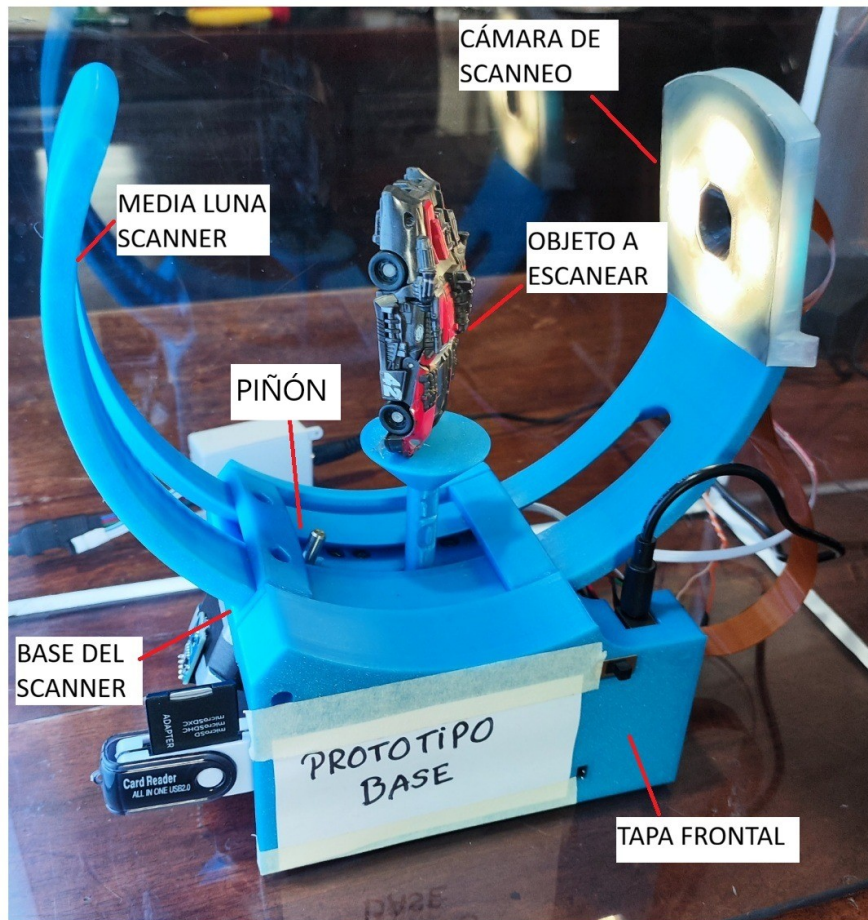


Figura 21. Primer prototipo funcional. [81]

VI-B. Rediseño de piezas mecánicas para posterior fundición

Una vez validado el diseño inicial mediante impresión en PLA, se procedió al rediseño completo de las piezas mecánicas para adaptarlas al proceso de fundición en aluminio reciclado. Esta fase fue una de las más críticas e importantes, debido a que la fundición con moldes de arena impone restricciones geométricas que no se aplican en impresión 3D, así como la necesidad de facilitar la retirada del patrón sin dañar el molde, evitar socavado (formas que impiden la extracción), y considerar la contracción del metal durante el enfriamiento, la cual en el caso del aluminio fundido en arena se estima entre un 1.1 % y 1.3 % de contracción lineal. El rediseño se realizó en SolidWorks, para así lograr optimizar cada pieza para que esta pudiera dividirse en secciones manejables, se fundiera por separado y luego se uniera, para lograr mantener la funcionalidad, rigidez y precisión del mecanismo para escaneo.

VI-B1. Piezas originales del diseño inicial e inconvenientes detectados: Los componentes del diseño original (base principal, soporte de media luna dentado, plataformas de giro y montajes de cámara) se realizó la optimización para la impresión 3D en PLA. Esta tecnología admite realizar geometrías complejas y detalles minuciosos sin que el desmoldeo sea un factor crítico. No obstante, tras el análisis orientado a la fundición, surgieron limitaciones técnicas. Se detectaron formas cerradas y socavados que entorpecen la extracción del patrón de arena, así como secciones delgadas con riesgo de rotura durante el vertido del metal. Asimismo, las dimensiones originales exigían moldes de gran volumen, mismas que son difíciles de gestionar en un entorno artesanal. La integración de múltiples piezas en una sola estructura también dificultaba la compactación de la arena y elevaba la probabilidad de defectos como porosidad o inclusiones. Estas dificultades motivaron un rediseño integral donde se priorice la divisibilidad y la simplicidad geométrica.

VI-B2. Principios de adaptación para fundición en moldes de arena: El rediseño se rige por las reglas técnicas de la fundición en arena. Cada componente se fragmentó en partes que puedan admitir una extracción sencilla del molde sin comprometer la integridad de la arena. Para ello, se evitaron ángulos negativos y cavidades internas de gran profundidad. Se aplicaron inclinaciones de 2-5° en las paredes para facilitar la extracción del patrón, y se eliminaron o simplificaron undercut mediante división o rediseño de la geometría. Se consideró la contracción del aluminio (aproximadamente 1-2 % lineal), aumentando ligeramente las dimensiones de las piezas para compensar la reducción al enfriarse. Además, se diseñaron canales de alimentación y respiraderos en cada sección para evitar defectos como rechupes o porosidad durante el vertido.

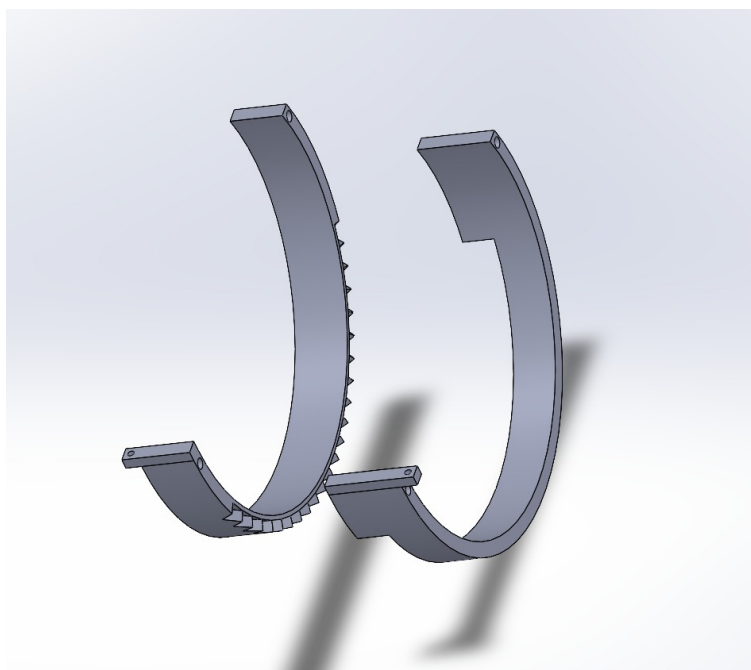


Figura 22. Separación en dos partes de la media luna para una posterior elaboración de las piezas por medio de fundición.[81]

VI-B3. Rediseño de la base principal: La base principal, que soporta los motores NEMA 17, la Raspberry Pi con Pi-Shield y la fuente de alimentación, se dividió en tres partes principales: base inferior, soportes laterales y tapa superior. La base inferior se rediseñó con una forma rectangular simple y reforzada, con draft angles en

las paredes externas y orificios pasantes para tornillos de unión. Los soportes laterales se separaron para permitir moldeo independiente, con superficies planas y sin undercut. La tapa superior incluye ranuras para cables y orificios para fijación, con tolerancias aumentadas para compensar la contracción. Esta división facilitó la creación de moldes pequeños y manejables, reduciendo el riesgo de defectos y permitiendo fundir cada parte por separado.

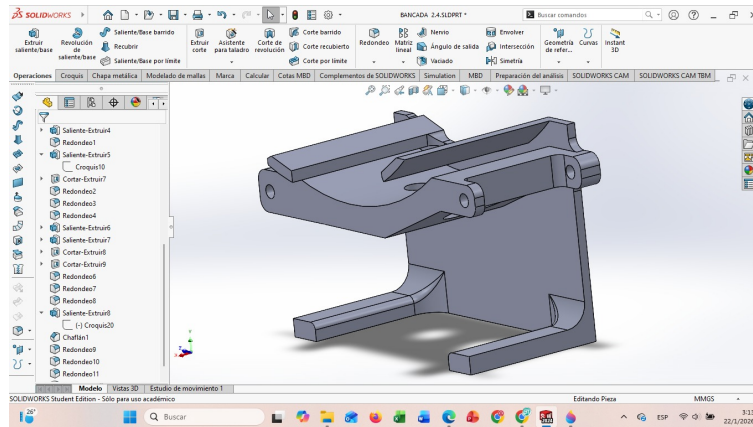


Figura 23. Elaboración de nueva base en SolidWorks para realizar fundición.[81]

VI-B4. Rediseño de la media luna y plataformas pan: La media luna, pieza semicircular con dientes para el movimiento tilt, se dividió en dos mitades (superior e inferior) para evitar socavados en la zona dentada. Cada mitad se rediseñó con ángulos de desmoldeo en las caras curvas y superficies planas para facilitar la retirada del patrón. Los dientes se mantuvieron en módulo estándar, pero se simplificaron los perfiles para reducir la complejidad del molde. Las plataformas pan (tres versiones iterativas) se rediseñaron como discos planos con rebordes y refuerzos radiales, divididos en dos o tres segmentos si era necesario, con orificios centrales para el eje y tolerancias ajustadas para el acoplamiento al motor.

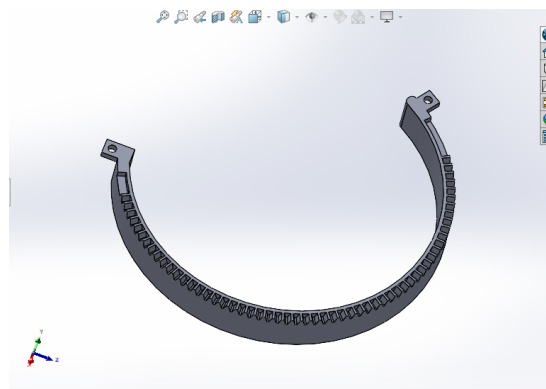


Figura 24. Elaboración de media luna en SolidWorks para realizar fundición.[81]

VI-B5. Rediseño de tapas frontal y posterior: Las tapas frontal y posterior se rediseñaron como placas planas con rebordes y orificios para fijación, dividiéndose en secciones cuando la geometría lo requería, con el fin de simplificar su fabricación. Se eliminaron cavidades internas profundas y se incorporaron ángulos de desmoldeo

en las superficies necesarias. El rediseño se validó virtualmente en SolidWorks mediante ensamblajes digitales, en los que se integraron la base, la tapa frontal y la Raspberry Pi, logrando verificar la correcta alineación de los componentes, el posicionamiento relativo del hardware y la ausencia de interferencias. Este proceso de ensamblaje virtual permitió comprobar que las tolerancias definidas eran adecuadas para el montaje, asegurando compatibilidad dimensional y un ajuste correcto antes de la fabricación de los patrones para fundición.

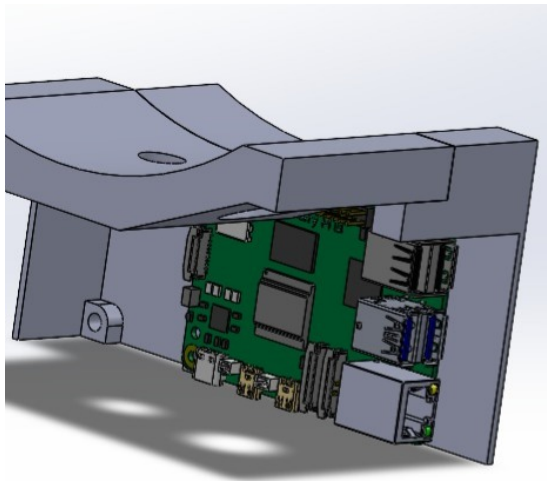


Figura 25. Elaboración de Tapa frontal en SolidWorks para realizar fundición.[81]

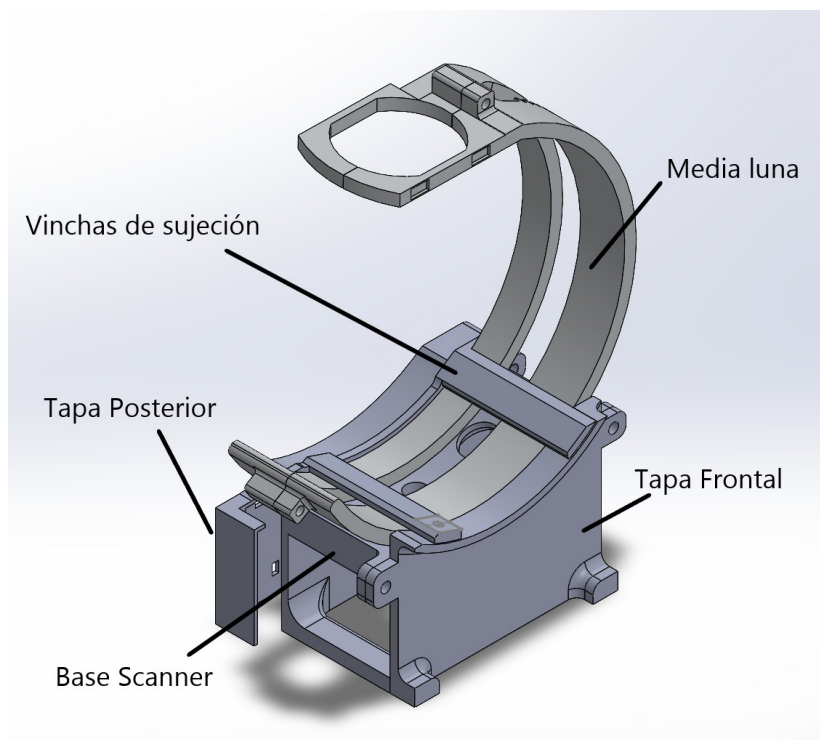


Figura 26. Ensamble de piezas rediseñadas para la fundición.[81]

VI-C. Diseño y construcción de caja de acrílico para medición de iluminancia

Como parte del desarrollo del sistema, se abordó la iluminación como un parámetro de suma relevancia en la calidad de los modelos 3D obtenidos mediante fotogrametría, ya que esto influye directamente en la nitidez de las imágenes, la reducción de reflejos y la fidelidad de texturas en conjunto con los detalles geométricos. En este contexto, se diseñó e implementó una caja de acrílico que genera un entorno de iluminación controlado, para reducir la influencia de la luz externa durante el proceso de escaneo.

En el mismo entorno se integró un sistema de medición de iluminancia para registrar los niveles de luz durante la captura de imágenes. Con estos datos, es posible ejecutar ensayos bajo distintas intensidades lumínicas y analizar el nexo con la calidad de los modelos tridimensionales resultantes. Este planteamiento ofrece una base cuantitativa para que sirve para evaluar el impacto de la luz sobre el desempeño del sistema de escaneo.

VI-C1. Diseño de la estructura de la caja: La caja de acrílico se proyectó para aislar el proceso de escaneo. El objetivo es mitigar la influencia de fuentes externas y asegurar que la iluminación sea constante en cada toma. Para su desarrollo se empleó el software SolidWorks, donde se modeló la estructura con las dimensiones justas para albergar la plataforma *pan-tilt*, la cámara y la pieza de estudio.

Se diseñó una estructura tipo caja cerrada, conformada por paneles planos de acrílico, con el fin de facilitar su fabricación y ensamblaje. El diseño contempla un espacio suficiente para el movimiento de la plataforma y la correcta orientación de la cámara durante el proceso de escaneo.

Adicionalmente, se incorporó una puerta frontal abatible mediante el uso de bisagras, permitiendo el acceso al interior de la caja para la colocación y retiro de las piezas. Este elemento se diseñó de manera que mantenga un adecuado cierre durante la operación, y evitar la entrada de luz externa que pudiera afectar las condiciones de iluminación interna.

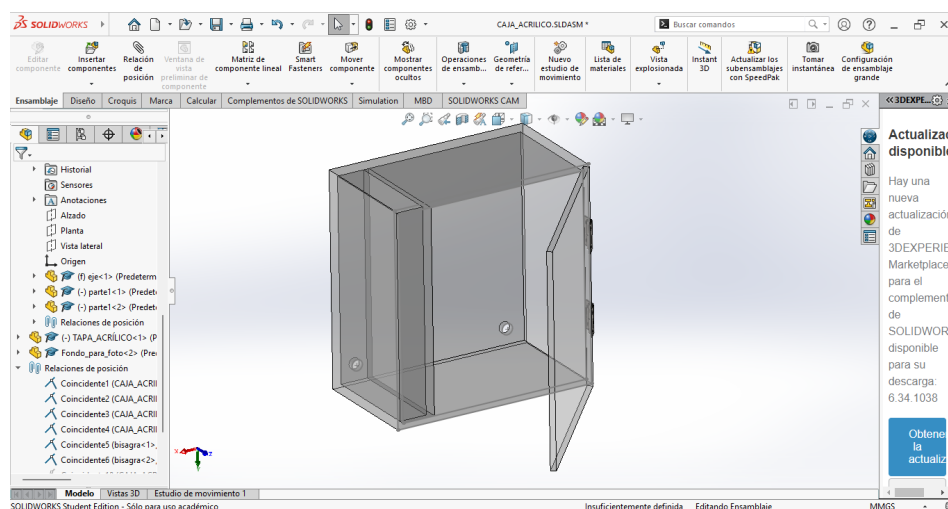


Figura 27. Ensamblaje de caja de acrílico realizada en SolidWorks.[81]

Finalmente, se consideraron aberturas específicas para el paso de cables de alimentación y conexión de los distintos componentes del sistema, procurando mantener el aislamiento del entorno interno. Asimismo, se definió la ubicación del sensor de iluminancia dentro del volumen de trabajo, de modo que las mediciones correspondan directamente a las condiciones de iluminación presentes sobre el objeto durante el escaneo.

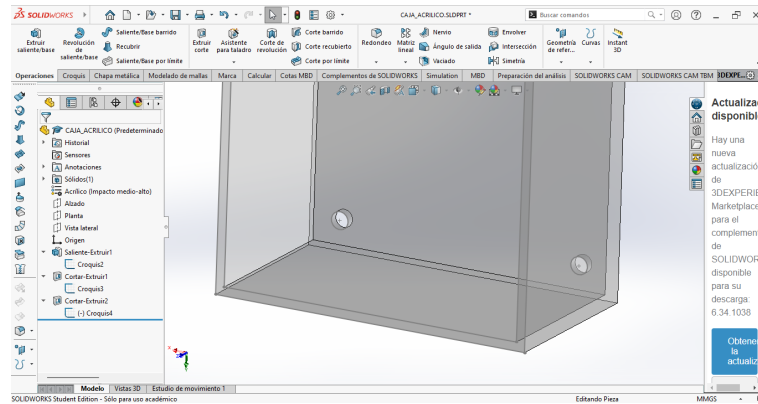


Figura 28. Aberturas para paso de cableado.[81]

VI-C2. Construcción y ensamblaje de la caja: Una vez definido el diseño de la caja en el entorno CAD, se procedió a la fabricación de la estructura utilizando láminas de acrílico de 5 mm de espesor. Este material fue seleccionado por su rigidez, facilidad de mecanizado y transparencia, lo que permite visualizar el proceso de escaneo durante su funcionamiento.

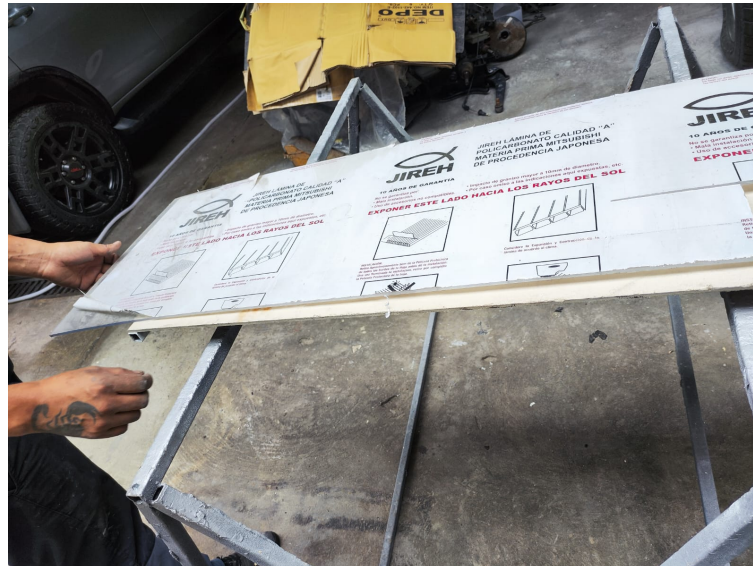


Figura 29. Lámina de acrílico a utilizar para construcción de caja.[81]

El corte de las piezas se realizó de acuerdo con las dimensiones establecidas en el diseño, obteniendo los paneles correspondientes a la base, laterales, parte superior y puerta frontal. Se procuró mantener precisión en los cortes para asegurar un adecuado ensamblaje y evitar desalineaciones que pudieran afectar la estabilidad de la estructura.



Figura 30. Realización de los cortes para armado de caja.[81]

El ensamblaje se llevó a cabo mediante adhesivo especializado para acrílico, aplicándolo en las uniones entre paneles para lograr una fijación firme. Durante este proceso, se verificó el correcto alineamiento de las piezas, asegurando la perpendicularidad entre caras y la rigidez del conjunto.



Figura 31. Ensamblaje de láminas de acrílo con silicón. [81]

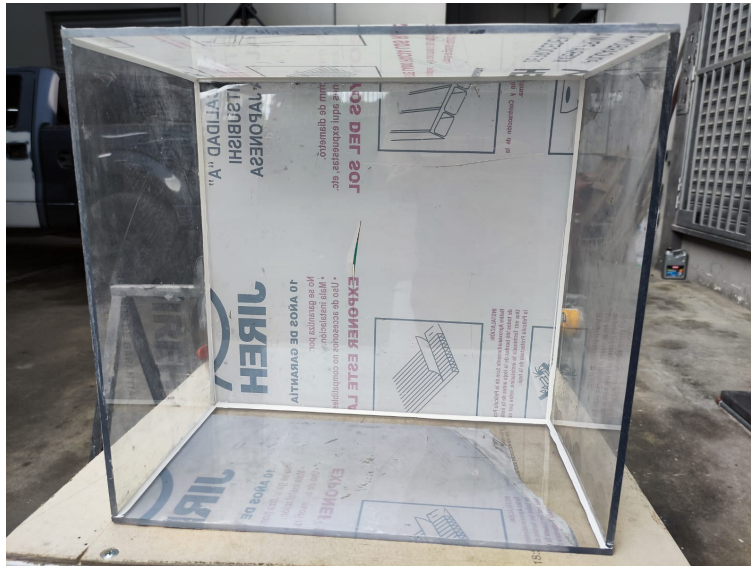


Figura 32. Ensamblaje de acrílico.[81]

Para facilitar el acceso al interior de la caja, se implementó una puerta frontal abatible mediante el uso de bisagras. Este elemento permite la colocación y retiro de las piezas a escanear de manera práctica, además de facilitar el acceso a los componentes internos del sistema.



Figura 33. Instalación de puerta abatible.[81]

Adicionalmente, se instaló una pequeña manigueta de forma cuadrada en la puerta frontal, con el objetivo de facilitar su apertura y manipulación durante el uso del sistema. Este elemento permite un agarre más cómodo al momento de acceder al interior de la caja, evitando el contacto directo con las superficies del acrílico y contribuyendo a una operación más práctica del conjunto.



Figura 34. Instalación de manigueta en puerta abatible.[81]

Finalmente, se realizaron verificaciones generales de la estructura, comprobando la estabilidad mecánica, el correcto funcionamiento de la puerta y la integridad de las uniones. Con ello, se asegura que la caja proporcione un soporte adecuado para la plataforma de escaneo y los elementos asociados al sistema.

VI-C3. Sistema de iluminación y difusión de luz: El sistema de iluminación se implementó utilizando tiras de LEDs RGB con control de intensidad, ubicadas en uno de los laterales internos de la caja de acrílico. Esta disposición permite modificar el nivel de iluminancia de forma controlada, lo cual resulta necesario para realizar pruebas bajo diferentes condiciones de iluminación y analizar su influencia en el proceso de escaneo.

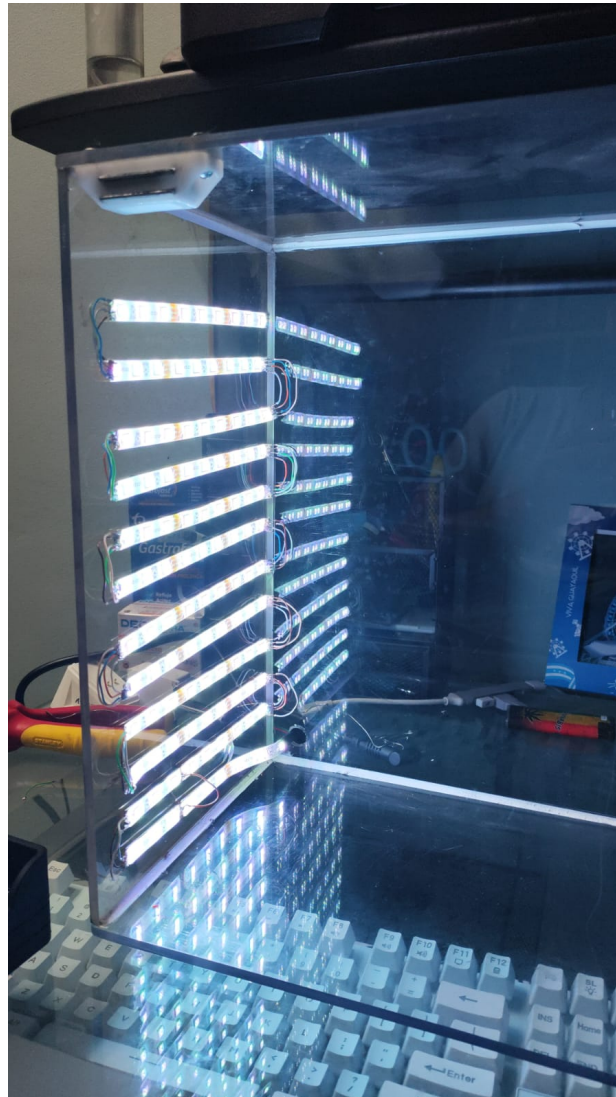


Figura 35. Implementación de luces leds para iluminación en escaneado.[81]

Se evitó la iluminación directa sobre el objeto, ya que esta puede generar reflejos intensos y zonas de saturación en las imágenes. En su lugar, se optó por una configuración lateral que favorece una distribución más uniforme de la luz dentro del volumen de trabajo, reduciendo la presencia de sombras pronunciadas que puedan afectar la captura de detalles.

Para mejorar la homogeneidad de la iluminación, se incorporó una lámina de acrílico lijado colocada entre las tiras de LEDs y el interior de la caja. Este elemento actúa como difusor, dispersando la luz y evitando puntos de iluminación concentrada sobre la superficie del objeto. Como resultado, se obtiene una iluminación más uniforme,

lo que contribuye a una mejor definición de las características superficiales en las imágenes capturadas.



Figura 36. Ubicación del sistema de iluminación y difusor dentro de la caja de acrílico.[81]

De esta manera, el sistema permite generar condiciones de iluminación más estables dentro de la caja, lo cual resulta adecuado para el proceso de adquisición de imágenes en fotogrametría y para la posterior evaluación de la calidad del escaneo.

VI-C4. Diseño del sistema de sensado de iluminancia: Para la medición de las condiciones de iluminación dentro de la caja, se planteó la integración de un sistema de sensado basado en un sensor digital, junto con una unidad de procesamiento y un sistema de visualización. El diseño consideró la disposición de los componentes de manera organizada, permitiendo su correcto funcionamiento y fácil acceso durante las pruebas.

En SolidWorks se desarrolló una estructura que permite alojar el sensor, la placa Arduino y la pantalla LCD en un solo conjunto. Este diseño facilita la manipulación del sistema y la lectura de los datos en tiempo real, manteniendo los componentes protegidos y correctamente fijados.

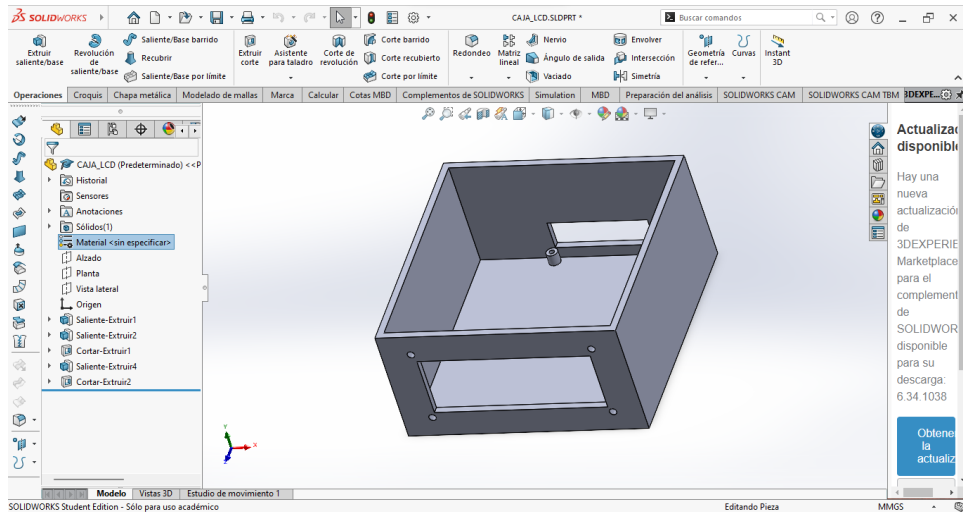


Figura 37. Diseño en 3D realizado en SolidWorks.[81]

VI-C5. Implementación del sistema de medición: Una vez definido el diseño, se procedió a la integración física de los componentes del sistema de medición. El sensor de iluminancia se ubicó dentro del volumen de trabajo de la caja, de manera que las mediciones correspondan a las condiciones reales de iluminación sobre el objeto a escanear.



Figura 38. Implementación de sistema de sensado.[81]

La pantalla LCD se posicionó en un lugar visible, permitiendo observar los valores registrados durante el funcionamiento del sistema. La disposición de los elementos se realizó de forma que no interfieran con el proceso de escaneo ni con el movimiento de la plataforma pan-tilt.



Figura 39. LCD muestra valores de Iluminancia.[81]

Con esta configuración, se logra un sistema de medición estable, capaz de registrar los niveles de iluminancia en unidades de lux bajo diferentes condiciones de iluminación.

VI-C6. Programación del sistema de adquisición de datos: Para la adquisición de los datos de iluminancia, se desarrolló un programa en la plataforma Arduino IDE, el cual permite la lectura de los valores proporcionados por el sensor y su visualización en la pantalla LCD.

El sistema fue configurado para realizar lecturas periódicas, mostrando los valores en lux en tiempo real. Esto permite monitorear las condiciones de iluminación durante las pruebas y realizar ajustes en el sistema de iluminación según sea necesario.

La implementación de este sistema facilita la recopilación de datos experimentales, los cuales serán utilizados posteriormente para analizar la relación entre la iluminancia y la calidad del escaneo tridimensional. El diseño

e implementación electrónica del sistema de sensado de iluminancia, incluyendo el esquema de conexión y la configuración de los componentes, se describe en la siguiente sección.

```
SENSADO_DE_ILUMINANCIA.ino
1  #include <Wire.h>
2  #include <BH1750.h>
3  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4
5  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
6  BH1750 lightMeter;
7
8  bool bh1750_ok = false;
9  void setup() {
10     Wire.begin();
11     lcd.init();
12     lcd.backlight();
13     lcd.clear();
14     lcd.setCursor(0, 0);
15     lcd.print("Iniciando...");
16
17     bh1750_ok = lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE);
18     delay(800);
19     if (!bh1750_ok) {
20         lcd.clear();
21         lcd.setCursor(0, 0);
22         lcd.print("ERROR BH1750");
23         lcd.setCursor(0, 1);
24         lcd.print("Revise I2C");
25     } else {
26         lcd.clear();
27         lcd.setCursor(0, 0);
28         lcd.print("BH1750 OK");
29         lcd.setCursor(0, 1);
30         lcd.print("Leyendo lux...");
31         delay(800);
32     }
33 }
34 void loop() {
35     if (!bh1750_ok) {
36         bh1750_ok = lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE);
37         if (bh1750_ok) {
38             lcd.clear();
39             lcd.setCursor(0, 0);
40             lcd.print("BH1750 OK");
41             lcd.setCursor(0, 1);
42             lcd.print("Leyendo lux...");
43             delay(800);
44         } else {
45             delay(1000);
46         }
47         return;
48     }
49     float lux = lightMeter.readLightLevel();
50     if (lux < 0 || lux > 65535) {
51         lcd.clear();
52         lcd.setCursor(0, 0);
53         lcd.print("Lectura inval.");
54         lcd.setCursor(0, 1);
55         lcd.print("Revise sensor");
56         delay(1000);
57         return;
58     }
59     lcd.clear();
60     lcd.setCursor(0, 0);
61     lcd.print("Iluminancia:");
62     lcd.setCursor(0, 1);
63     lcd.print("Lux: ");
64     lcd.print((unsigned long)(lux + 0.5));
65     lcd.print(" lx");
66
67     delay(500);
68 }
```

Figura 40. Primera parte de la programación del sistema de sensado de iluminancia.[81]

VI-D. Circuito electrónico para funcionamiento del scanner

El diseño y montaje del circuito electrónico constituyó una de las etapas clave del proyecto, ya que permitió la integración y control automatizado de los componentes mecánicos y ópticos de la plataforma pan-tilt. El circuito se diseñó para operar con una fuente de alimentación única de 12 V / 2.5 A, distribuyendo la potencia de forma segura entre los motores paso a paso, la Raspberry Pi 4B, los controladores A4988, el anillo de luz LED y la cámara externa Arducam IMX519. Se priorizó la simplicidad, la fiabilidad y el bajo costo, utilizando componentes accesibles y realizando el montaje inicial en protoboard para facilitar pruebas y ajustes antes de la implementación definitiva.

El esquema eléctrico principal (Figura 41) muestra la distribución de potencia desde la fuente de 12 V. La alimentación entra a través de un interruptor de encendido simple que controla el flujo hacia un regulador o directamente a los componentes de mayor consumo. La Raspberry Pi 4B recibe alimentación a 5 V mediante su puerto USB-C o pines GPIO, con un convertidor DC-DC si es necesario para estabilizar la tensión y evitar picos que pudieran dañar la placa. Los controladores A4988 se alimentan directamente en el pin VMOT (12 V), con condensadores de desacoplo (100 μ F recomendados) para filtrar ruido y proteger contra picos de corriente durante los pasos del motor. Cada uno de estos componentes y sus respectivas conexiones se describen con mayor detalle en las subsecciones siguientes.

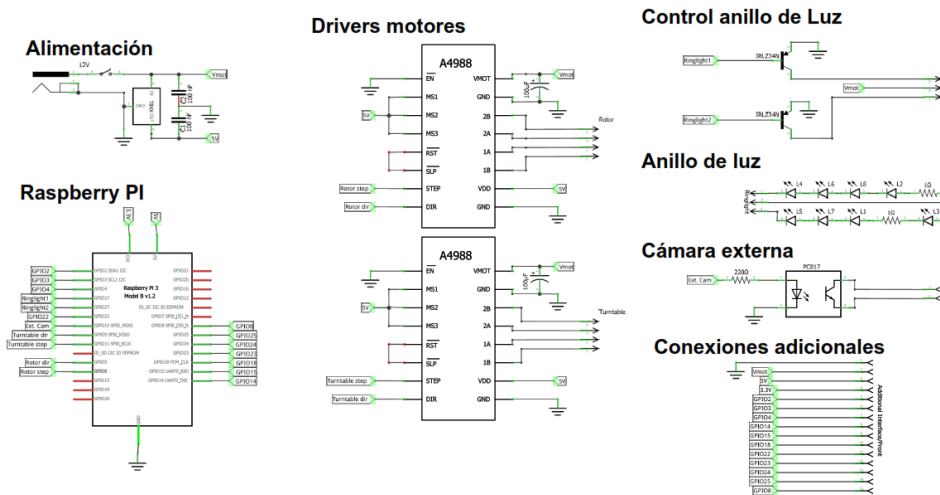


Figura 41. Esquema eléctrico completo del sistema (diseñado en Fritzing).[81]

VI-D1. Alimentación y distribución de potencia: La fuente de alimentación de 12 V / 2.5 A se conecta directamente al interruptor principal y luego se distribuye a través de rieles de potencia en la protoboard. Se separaron los rieles de 12 V (para motores y LED) y 5 V (para Raspberry Pi y lógica de control) para evitar interferencias. Se incluyeron fusibles o resistencias limitadoras en las líneas principales para proteger el circuito contra cortocircuitos. La Raspberry Pi 4B recibe su alimentación a través de un regulador lineal o buck converter que asegura 5 V estables, mientras que los drivers A4988 y el anillo LED operan directamente a 12 V, con condensadores electrolíticos y cerámicos en paralelo para estabilizar la tensión durante picos de consumo.

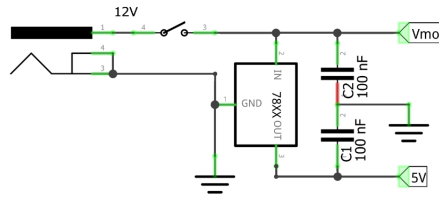


Figura 42. Esquema eléctrico de la alimentación del sistema (diseñado en Fritzing).[81]

VI-D2. Controladores de motores (drivers A4988) y conexión a Raspberry Pi: El sistema utiliza dos controladores A4988 para manejar los motores NEMA 17 (uno de $13 \text{ N} \cdot \text{cm}$ para el eje pan y otro de $40 \text{ N} \cdot \text{cm}$ para el tilt). Cada driver se conecta a la Raspberry Pi mediante pines GPIO específicos: STEP (para generar pulsos de avance), DIR (para definir la dirección), ENABLE (para habilitar/deshabilitar el driver), y MS1/MS2/MS3 (para configurar microstepping, usualmente en 1/16 para mayor precisión y suavidad). La alimentación lógica (VDD) se toma de 5 V de la Raspberry Pi, y GND es común. El diagrama muestra dos bloques A4988 independientes, con conexiones paralelas para STEP y DIR (por ejemplo, GPIO 17 y 18 para un motor, GPIO 23 y 24 para el otro), permitiendo control independiente de cada eje mediante software.

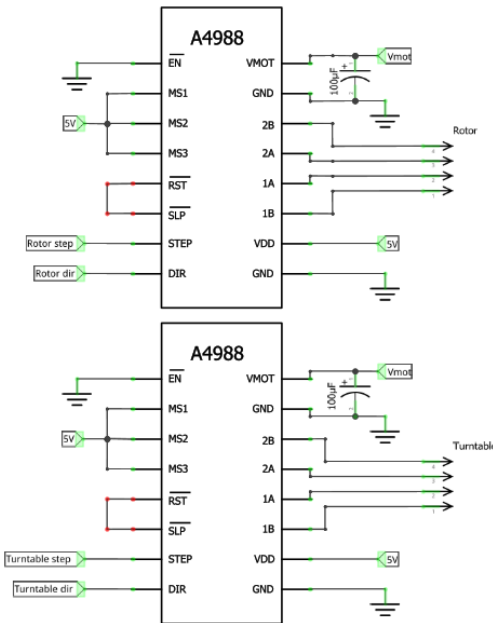


Figura 43. Esquema eléctrico de conexión de los drivers de los motores (diseñado en Fritzing).[81]

VI-D3. Control del anillo LED y polarizador: El anillo LED (ringlight) se controla mediante un circuito de conmutación con MOSFET (PLZ24 o equivalente) conectado a un pin GPIO de la Raspberry Pi (por ejemplo, GPIO 27). El MOSFET actúa como interruptor de alta corriente, permitiendo encender/apagar o modular la intensidad mediante PWM. El diagrama muestra el ringlight con LEDs en serie/paralelo, resistencias limitadoras por LED y conexión a 12 V desde la salida del MOSFET. El polarizador se integra pasivamente en el soporte de la cámara, sin conexión eléctrica adicional, pero su posición se ajusta para reducir reflejos en piezas mecánicas.

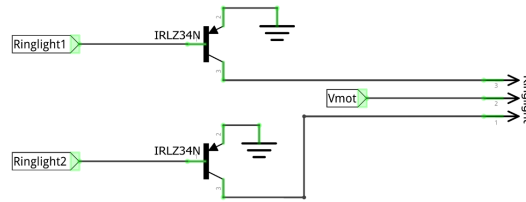


Figura 44. Esquema eléctrico del control del anillo de Luz (diseñado en Fritzing).[81]

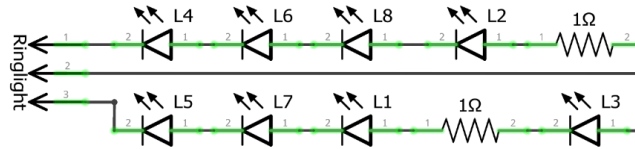


Figura 45. Esquema eléctrico de conexión del anillo de Luz (diseñado en Fritzing).[81]

VI-D4. Conexión de la cámara externa y interfaz adicional: La cámara Arducam IMX519 se conecta directamente al puerto CSI de la Raspberry Pi mediante cable ribbon, permitiendo control completo desde el software. El diagrama incluye una interfaz adicional con pines GPIO para posibles sensores o botones (por ejemplo, GPIO para start/stop manual o sensor de luz), conectados a través de protoboard o conectores. Esto facilita la sincronización de movimientos y disparos.

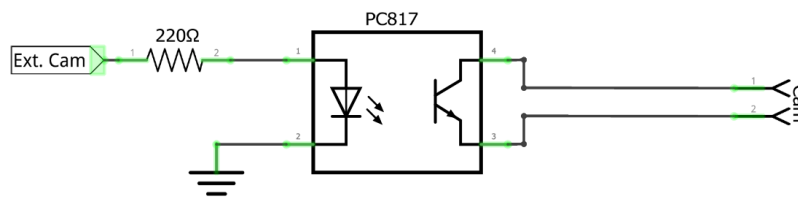


Figura 46. Esquema eléctrico de conexión de cámara externa (diseñado en Fritzing).[81]

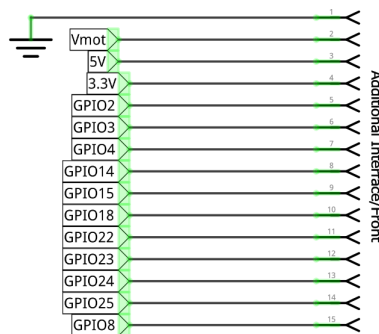


Figura 47. Esquema eléctrico de conexiones adicionales (diseñado en Fritzing).[81]

La Figura 48 muestra la implementación física del sistema electrónico sobre una protoboard, donde se integran los principales componentes de control y potencia. Se observa la Raspberry Pi 4B como unidad central, conectada a los controladores de motores paso a paso A4988, los cuales gestionan el accionamiento de los motores NEMA 17 correspondientes a los ejes de movimiento pan y tilt. La alimentación principal de 12 V se distribuye hacia los controladores y se regula para suministrar 5 V a la Raspberry Pi mediante un convertidor DC-DC. Asimismo, se incorporan condensadores de desacoplo para reducir ruido eléctrico y proteger los circuitos ante variaciones de corriente. El esquema también incluye el sistema de iluminación LED y los elementos auxiliares de control, evidenciando la integración completa del sistema mecánico y electrónico.

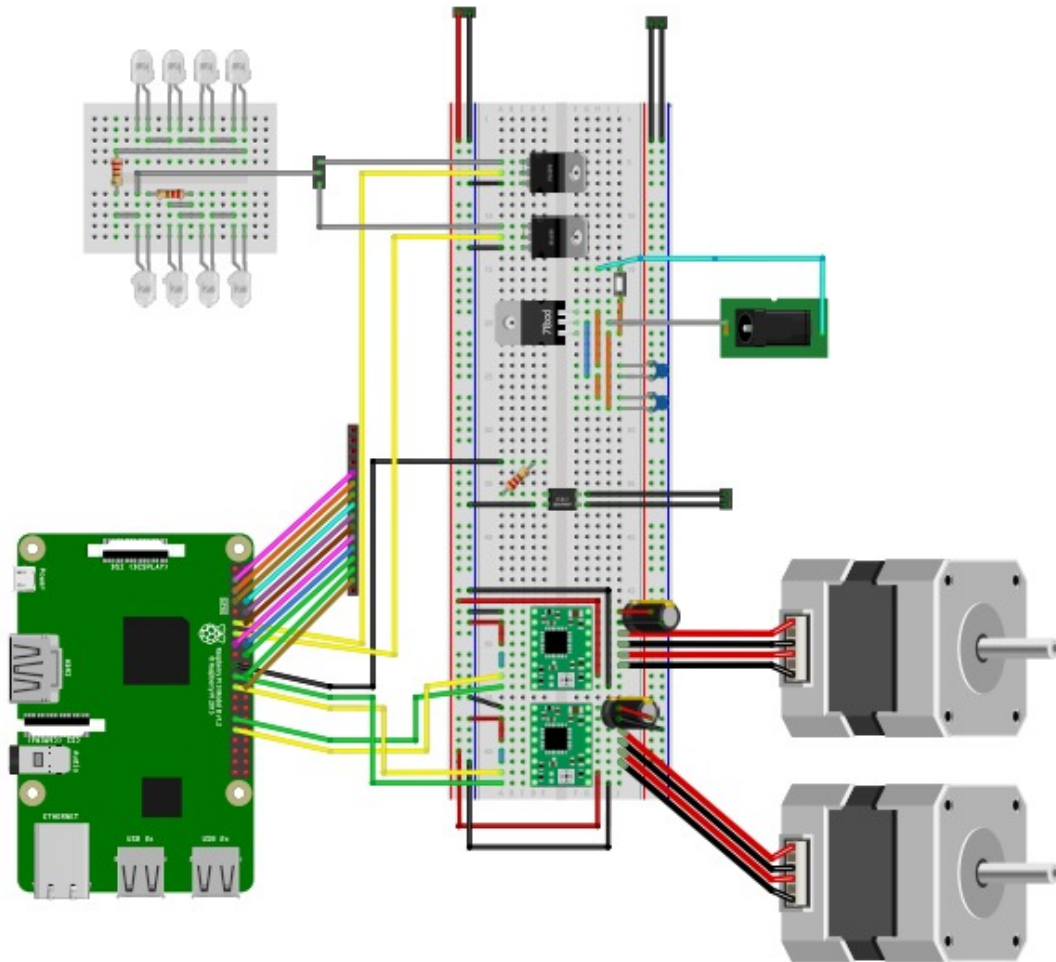


Figura 48. Esquema en banco de pruebas Fritzing.[81]

VI-E. Circuito electrónico para funcionamiento de sistema de sensado de iluminancia

El sistema de sensado de iluminancia se implementa como un subsistema electrónico independiente, cuya función es medir las condiciones de iluminación presentes durante el proceso de escaneo. Este sistema permite obtener valores cuantitativos de iluminancia en unidades de lux, los cuales sirven como referencia para el análisis de las condiciones de captura de imágenes. Para su desarrollo, se emplea un sensor digital de luz, un microcontrolador para el procesamiento de datos y un módulo de visualización que permite observar las mediciones en tiempo real.

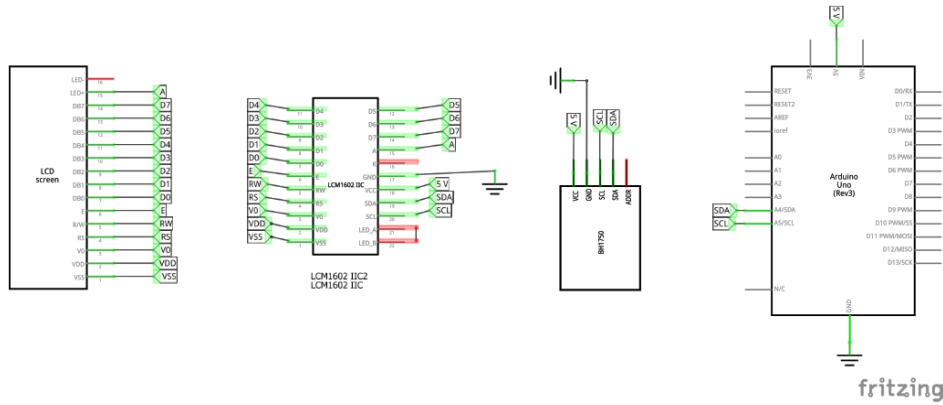


Figura 49. Esquema de conexión de sistema de sensado de iluminancia (diseñado en Fritzing). [81]

VI-E1. Microcontrolador Arduino Uno: El Arduino Uno actúa como unidad de control del sistema de sensado de iluminancia, encargándose de la adquisición de datos provenientes del sensor BH1750 y de su posterior visualización en la pantalla LCD. Este microcontrolador gestiona la comunicación I2C entre los dispositivos y procesa las lecturas de iluminancia durante la ejecución del programa de medición en tiempo real.

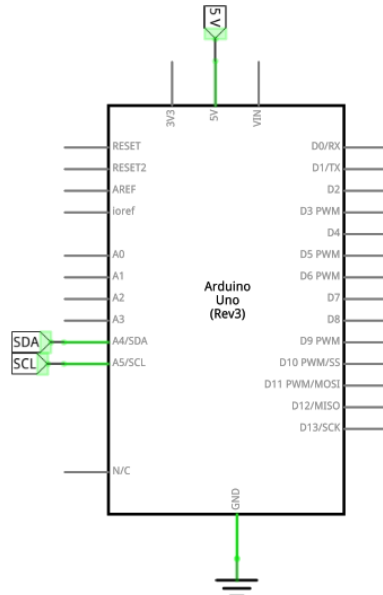


Figura 50. Esquema de conexión del Arduino Uno para sistema de sensado (diseñado en Fritzing). [81]

La elección de esta plataforma responde a su facilidad de uso, disponibilidad y compatibilidad con sensores digitales; estas características la sitúan como una opción muy viable para sistemas de medición que sean de bajo costo. Asimismo, el Arduino suministra 5 V a los módulos conectados, lo que ayuda a simplificar el diseño del circuito y poder evitar la necesidad implementar fuentes adicionales.

VI-E2. Sensor de iluminancia BH1750: El sensor BH1750 es el componente que mide la iluminancia en el entorno de escaneo para entregar valores directamente en unidades de lux. Este dispositivo utiliza el protocolo digital I2C, arquitectura que proporciona una transmisión de datos precisa y muy estable hacia el microcontrolador.

Este módulo se conecta a los pines SDA y SCL del Arduino (A4 y A5 respectivamente), además de las líneas de alimentación (VCC) y tierra (GND). Por su alta resolución y su alta capacidad de lectura directa, el BH1750 logra cumplir con las exigencias de aquellos proyectos que necesitan cuantificar la intensidad de luz con fiabilidad.

Su integración en el sistema facilita la obtención de datos en tiempo real. Esta información servirá para un análisis posterior sobre el vínculo entre la iluminancia y la calidad del escaneo tridimensional del sistema.

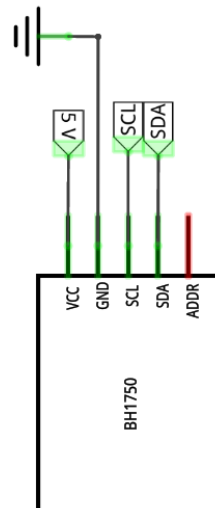


Figura 51. Esquema de conexión del sensor BH1750 (diseñado en Fritzing). [81]

VI-E3. Visualización de datos mediante LCD 16x2: Para la visualización de los valores de iluminancia, se emplea un módulo LCD 16x2 con interfaz I2C, el cual permite mostrar los datos de forma clara y en tiempo real. La interfaz I2C disminuye el volumen de cableado al compartir las líneas de comunicación con el sensor BH1750.

El monitor se enlaza a los pines SDA y SCL del Arduino, además de las tomas de voltaje y tierra. A través de la programación del microcontrolador, los valores de iluminancia se actualizan en el cristal líquido, lo que ofrece un monitoreo de manera constante de la luz durante cada ensayo.

Este sistema de visualización agiliza la lectura de los datos sin depender de equipos externos. Tal autonomía favorece la interacción con el prototipo y asegura la ejecución de ajustes lumínicos al instante del escaneo, según los requerimientos de la prueba en curso.

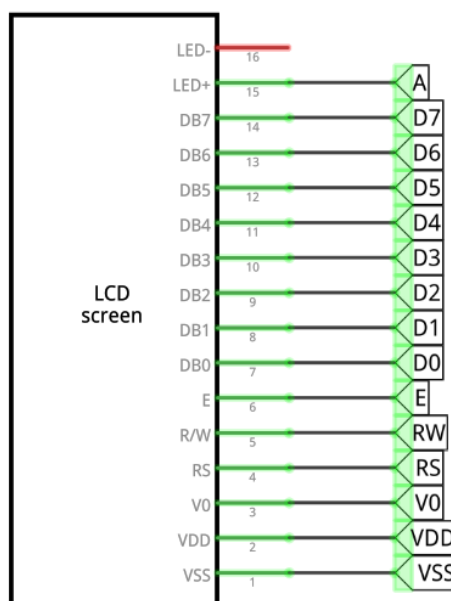


Figura 52. Esquema de conexión del módulo LCD 16x2 con interfaz I2C (diseñado en Fritzing). [81]

VI-E4. Comunicación I2C y distribución de conexiones: El sistema de sensado de iluminancia opera bajo comunicación I2C, un protocolo que enlaza múltiples dispositivos mediante el uso exclusivo de dos líneas: SDA (datos) y SCL (reloj). En este montaje, tanto el sensor BH1750 como el módulo LCD comparten el mismo bus y se conectan en paralelo a los pines del Arduino.

Esta configuración reduce la complejidad del cableado y agiliza la integración de los componentes, lo que se traduce en un intercambio de datos muy eficiente. Además, se establece una referencia común de tierra (GND) y una línea de 5 V, distribuidas a través de la línea de conexión para lograr asegurar la operatividad del conjunto.

El montaje físico en la placa de pruebas replica con exactitud el esquema de Fritzing. Este paso previo consigue asegurar la transmisión íntegra de los datos y la estabilidad del sistema antes de proceder con la instalación definitiva de los elementos en el prototipo del escáner.

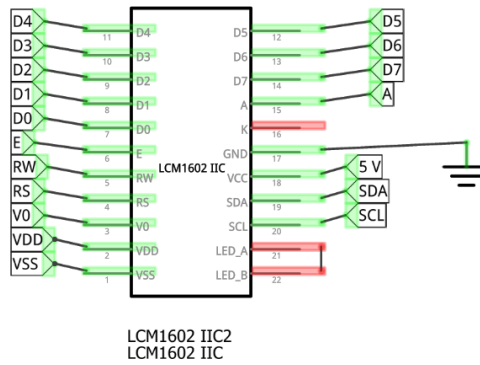


Figura 53. Esquema de conexión del módulo I2c (Diseñado en Fritzing). [81]

La disposición del sistema de sensado de iluminancia se detalla en un diagrama de protoboard desarrollado en Fritzing. Este esquema expone la ubicación de los componentes y sus trayectorias de conexión de forma nítida. El diseño integra el microcontrolador, el sensor de luz y el módulo de visualización, bajo una distribución lógica de las líneas de voltaje y los buses de datos. Tal representación técnica agiliza el montaje físico del circuito, ya que ofrece una guía visual directa de cada terminal. En la Figura 54 se observa el arreglo del sistema diseñado en el software.

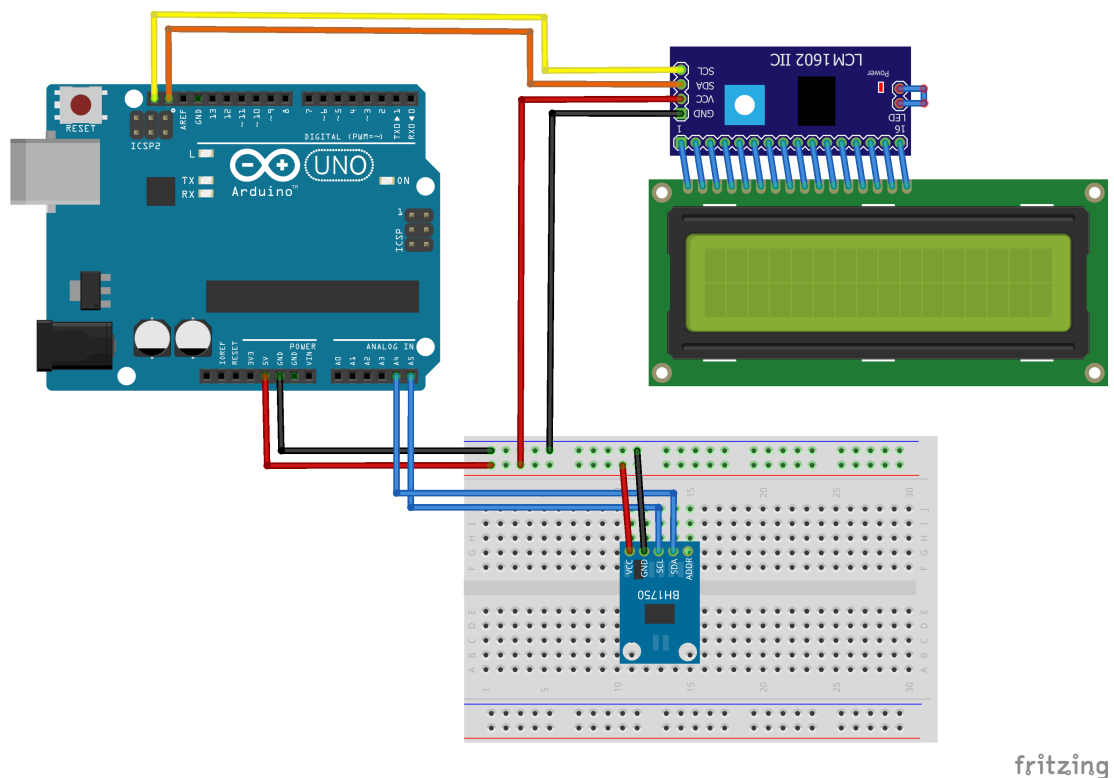


Figura 54. Montaje del sistema de sensado de iluminancia en protoboard (representación en Fritzing). [81]

VI-F. Fundición de aluminio

La fundición de aluminio reciclado representó la etapa central del proyecto, donde se transformaron los patrones impresos en 3D en piezas metálicas propias y duraderas para la plataforma pan-tilt. Este proceso se realizó de manera casera, utilizando moldes de arena y aluminio obtenido de latas de bebidas, con el objetivo de lograr componentes estructurales resistentes y de bajo costo, manteniendo la funcionalidad y precisión del diseño rediseñado. Se priorizó la seguridad, el control de calidad y la minimización de defectos, asegurando que las piezas fueran compatibles con el ensamblaje posterior.

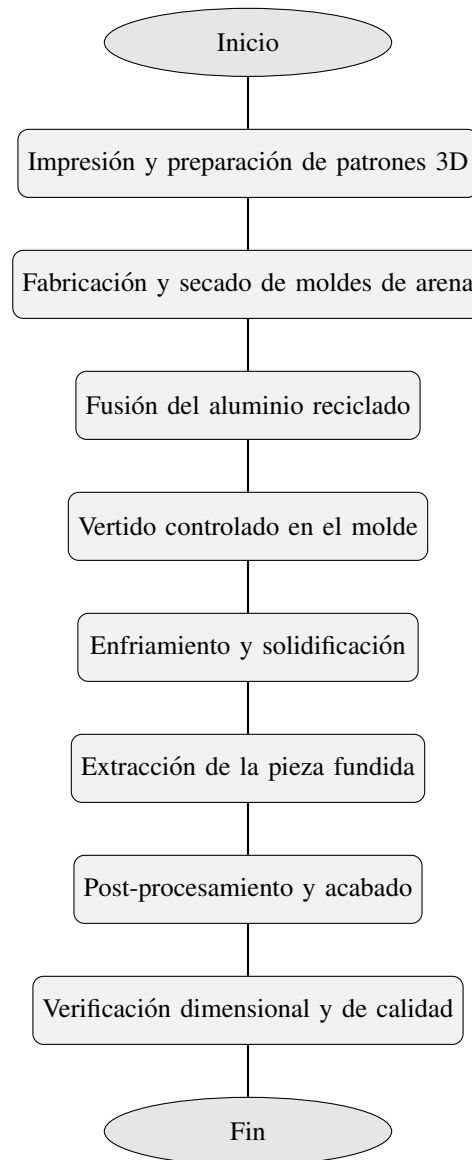


Figura 55. Diagrama de flujo del proceso de fundición de aluminio reciclado para las piezas de la plataforma pan-tilt.[81]

VI-F1. Preparación de patrones impresos en 3D: Antes de iniciar la fundición, se imprimieron en 3D todos los patrones de las piezas rediseñadas (base, media luna, tapas frontal y posterior, soportes y plataformas pan), utilizando PLA como material. Cada pieza se dividió en secciones manejables (de 2 a 5 partes según complejidad)

para facilitar el moldeo y la retirada del patrón sin dañar la arena. Las divisiones se realizaron considerando líneas de separación planas o con guías de alineación (espigas y orificios) que permitieran unir las piezas fundidas posteriormente con tornillos o epoxi. Se aplicaron draft angles ($2-5^\circ$) en SolidWorks y se imprimieron con alta precisión (capa de 0.15-0.2 mm, relleno 40-50 %) para obtener superficies lisas y tolerancias adecuadas. Los patrones se limpiaron, lijaron y se recubrieron con una fina capa de cera o desmoldante para facilitar su extracción del molde.



Figura 56. Piezas impresas en 3D para creación de moldes.[81]

VI-F2. Creación y preparación de moldes de arena: Los moldes se elaboraron con arena de fundición (mezcla de arena sílica, bentonita y agua) compactada manualmente alrededor de cada patrón dividido. Se utilizó una caja de moldeo casera (de madera o metal) dividida en dos mitades (copa y contracopa) para facilitar la apertura. Para cada sección del patrón, se compactó la arena en capas, presionando firmemente con herramientas manuales para evitar porosidad o colapsos durante el vertido. Se incorporaron canales de alimentación (sprue y runner) y respiraderos para permitir la salida de gases y evitar rechupes. Los moldes se secaron al aire o con calor suave para endurecer la arena antes del vertido, verificando que no hubiera grietas o zonas débiles que pudieran destruir el molde al verter el aluminio líquido.



Figura 57. Preparación de moldes para fundición.[81]

VI-F3. *Proceso de fundición pieza por pieza:* La fundición se realizó de manera secuencial, procesando una pieza o sección por vez para mantener el control y reducir riesgos. El aluminio reciclado (de latas limpias y clasificadas) se colocó en un crisol y se calentó en el horno hasta alcanzar aproximadamente 660-700 °C, punto de fusión del aluminio.



Figura 58. Horno caliente hasta alcanzar temperatura correcta.[81]

Se removió la viruta superficial para minimizar impurezas. El aluminio líquido se vertió lentamente en el molde a través del canal de alimentación, permitiendo que llenara todos los detalles sin turbulencias. El vertido se realizó con cuidado para evitar salpicaduras, y el molde se mantuvo quieto durante el llenado.



Figura 59. Vertido de aluminio dentro de moldes.[81]

Una vez realizado el vertido del aluminio en el molde, se procedió a un proceso de enfriamiento controlado. Inicialmente, los moldes se dejaron reposar con peso sobre su superficie, con el fin de evitar deformaciones y mantener la compactación de la arena durante la solidificación del material.



Figura 60. Colocación de peso sobre moldes y piezas fundidas.[81]

Posteriormente, se aplicó una pequeña cantidad de agua sobre el molde, permitiendo una reducción progresiva de la temperatura sin generar cambios bruscos que pudieran afectar la integridad de la pieza.



Figura 61. Preparación de moldes para fundición.[81]

Luego de esta etapa, los moldes fueron sumergidos completamente en agua para acelerar el enfriamiento y facilitar la manipulación posterior. Este proceso se realizó con precaución, ya que un descenso rápido de la temperatura puede generar tensiones internas en el material, provocando posibles grietas o fracturas en la pieza fundida. Por esta razón, se controló el tiempo de exposición al agua, asegurando un enfriamiento adecuado antes de la extracción.



Figura 62. Sumergido de moldes y piezas en agua.[81]

VI-F4. Extracción, post-procesamiento y verificación de calidad: Una vez finalizado el proceso de enfriamiento, se procedió a la apertura del molde y la extracción de la pieza fundida. Para ello, se retiró la arena de forma manual, liberando la pieza junto con los canales de alimentación y material sobrante. Este proceso se realizó con cuidado para evitar daños en las superficies recién solidificadas.



Figura 63. Extracción de piezas fundidas.[81]

Posteriormente, se eliminaron los excesos de material, tales como rebabas y canales de colada, utilizando herramientas manuales como sierra, lima y amoladora. Se efectuó una limpieza general de la pieza mediante cepillado, con el objetivo de remover restos de arena adherida y mejorar el acabado superficial.



Figura 64. Eliminación de excesos de material.[81]

Finalmente, se realizó una inspección visual de cada pieza, verificando la presencia de defectos como porosidad, grietas o deformaciones. En caso de ser necesario, se realizaron ajustes mediante lijado o mecanizado manual para asegurar el correcto acoplamiento en el ensamblaje del sistema.



Figura 65. Verificación de presencia de defectos.[81]

VI-G. Ensamblaje e integración del sistema

Con las piezas metálicas fabricadas mediante fundición de aluminio reciclado y terminadas (limado, perforaciones y ajustes), se procedió a la fase de ensamblaje físico e integración completa del prototipo. Esta etapa consistió en unir las estructuras metálicas con los componentes electrónicos y ópticos, verificando que el mecanismo pan-tilt operara con precisión, estabilidad y sin interferencias, listo para la conexión al software de escaneo.

VI-G1. Preparación de piezas metálicas para ensamblaje: Las piezas fundidas (base principal, media luna dividida, plataformas pan, tapas frontal y posterior, soportes para cámara y motores) se prepararon para el montaje mediante limado manual y mecanizado básico. Se eliminaron rebabas, rechupes residuales y arena adherida con limas, cepillos de alambre y papel de lija, logrando superficies lisas y precisas. Se realizaron perforaciones adicionales con taladro manual para orificios roscados o pasantes que no habían alcanzado la geometría final requerida durante la fundición, ajustando tolerancias para que los tornillos, tuercas y pernos encajaran sin holguras. Se verificó dimensionalmente cada pieza con calibrador para confirmar que las dimensiones coincidieran con el diseño CAD, compensando la contracción del aluminio. Esta preparación aseguró que las piezas metálicas tuvieran la rigidez y precisión necesarias para soportar los movimientos repetitivos sin deformación.



Figura 66. Preparación de piezas de aluminio.[81]

VI-G2. Montaje mecánico de las piezas fundidas: El ensamblaje comenzó por la base principal, fijando los motores NEMA 17 en sus soportes con tornillos y tuercas. La media luna (unida si se había fundido en partes) se acopló al motor tilt mediante el engranaje dentado, verificando que el movimiento de inclinación fuera suave y sin juego. Las plataformas pan se montaron en el eje horizontal, conectadas al motor correspondiente, y se ajustaron los refuerzos para eliminar vibraciones. Las tapas frontal y posterior se fijaron a la estructura base, cerrando el conjunto y protegiendo los componentes internos. Cada unión se aseguró con tornillos de métrica adecuada, aplicando torque controlado para evitar daños en el aluminio. Se verificó la alineación global de los ejes pan y tilt, asegurando que la cámara quedara centrada y apuntara correctamente durante los movimientos.



Figura 67. Ensamblaje e integración del sistema en físico.[81]

VI-G3. Integración de componentes electrónicos y ópticos: Con la estructura mecánica armada, se integraron los elementos electrónicos. Los drivers A4988 se fijaron en sus soportes y se conectaron a los motores y a la Raspberry Pi 4B con Pi-Shield mediante cables jumper o terminales soldados. La Raspberry Pi se montó en su posición dedicada, conectando la fuente de 12 V / 2,5 A y verificando que la alimentación llegara estable a todos los componentes. La cámara Arducam IMX519 se colocó en su soporte central, alineada óptimamente con el eje de la media luna, y se conectó al puerto CSI de la Raspberry Pi mediante cable ribbon. El anillo LED con polarizador se instaló alrededor de la cámara, ajustando su posición para minimizar reflejos en las piezas a escanear. Se realizó el cableado completo, organizando los cables para evitar interferencias con los movimientos y fijándolos con bridas o soportes.

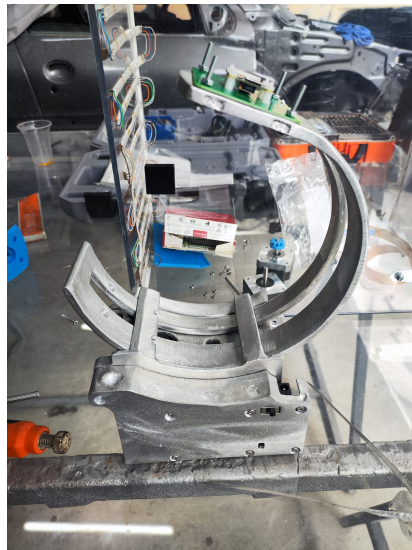


Figura 68. Ensamblaje e integración de componentes mecánicos y electrónicos.[81]

VI-G4. Verificación de encaje, alineación y pruebas preliminares: Se realizó una verificación completa del encaje y alineación: se movieron manualmente los ejes pan y tilt para comprobar que no hubiera interferencias, rozamientos o desalineaciones. Se activaron los motores a baja velocidad para probar la transmisión de movimiento, ajustando acoplamientos o agregando lubricante si era necesario. Se verificó que no existan vibraciones que pudieran afectar la calidad de las imágenes. Se realizó una prueba eléctrica básica con multímetro para confirmar continuidad, ausencia de cortocircuitos y alimentación correcta en cada componente. Finalmente, se probó la captura de una imagen simple con la cámara y el ringlight encendido, verificando que el sistema respondiera correctamente antes de la conexión al software.

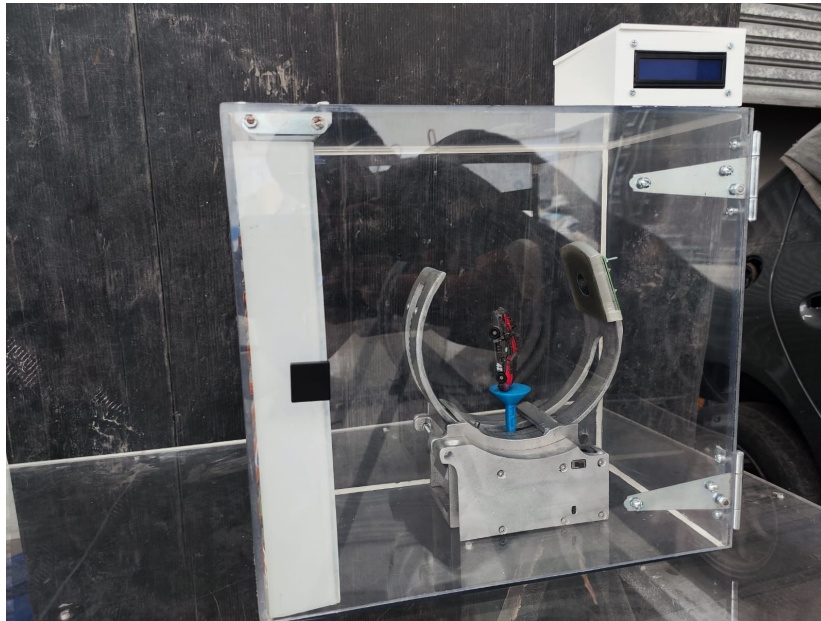


Figura 69. Verificación de encaje de piezas y funcionamiento.[81]

Esta fase culminó con un prototipo completamente armado y funcional, donde las piezas metálicas propias demostraron su resistencia y compatibilidad con los componentes electrónicos. El ensamblaje manual y los ajustes finales garantizaron que el mecanismo estuviera listo para la conexión al software de escaneo.

VI-H. Proceso de escaneo con plataforma de dos grados de libertad

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del scanner de dos grados de libertad.

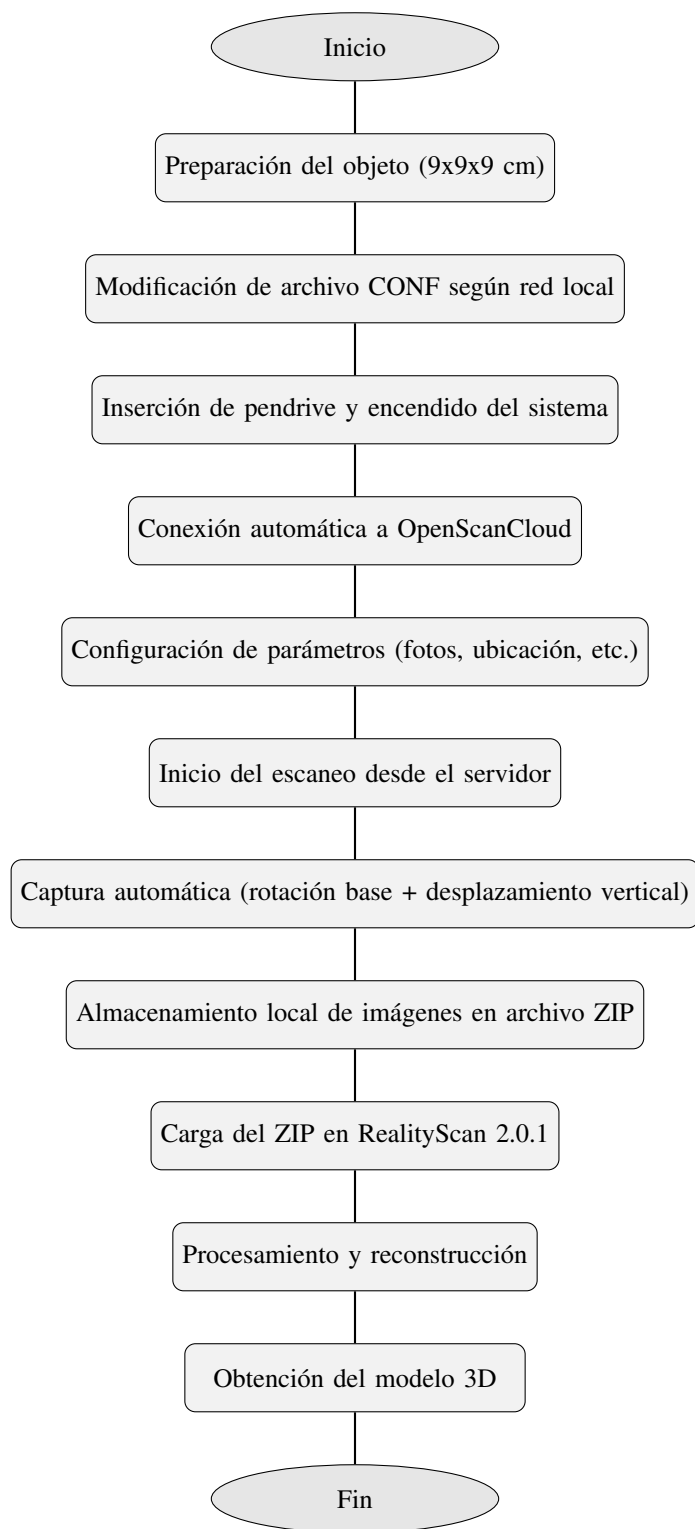
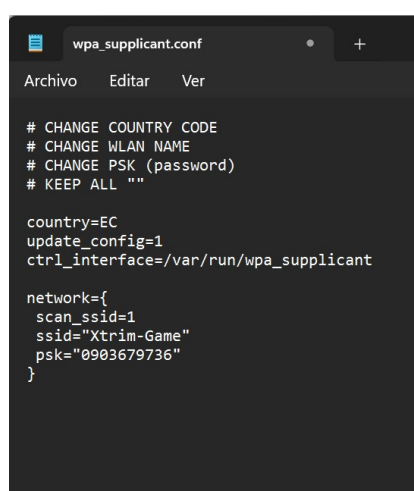


Figura 70. Diagrama de flujo del proceso completo de escaneo y generación del modelo 3D.[81]

VI-H1. Configuración y operación del sistema de escaneo: Una vez finalizado el ensamblaje del prototipo y verificado el funcionamiento general del sistema, se procedió a configurar la etapa de adquisición de imágenes, la cual permite controlar tanto el movimiento de la plataforma pan-tilt como la captura de fotografías necesarias para el proceso de escaneo. Esta etapa es muy importante, ya que de ella depende la cobertura angular del objeto y la calidad de la información obtenida.

El sistema opera mediante una Raspberry Pi que ejecuta el software OpenScan, el cual proporciona una interfaz web para su control. Para su puesta en marcha, se preparó previamente la memoria microSD con el sistema configurado.

En el archivo tipo .CONF se modificaron los parámetros de red necesarios, tales como el código de país, el nombre de la red inalámbrica y su respectiva contraseña. Con estos ajustes, la Raspberry Pi se conecta automáticamente a la red WiFi al momento de encenderse, permitiendo su acceso desde otros dispositivos.



```
wpa_supplicant.conf

Archivo  Editar  Ver

# CHANGE COUNTRY CODE
# CHANGE WLAN NAME
# CHANGE PSK (password)
# KEEP ALL ""

country=EC
update_config=1
ctrl_interface=/var/run/wpa_supplicant

network={
    scan_ssid=1
    ssid="Xtrim-Game"
    psk="0903679736"
}
```

Figura 71. Archivo tipo .CONF donde se deben de cambiar datos para conexión.[81]

Una vez establecida la conexión, el control del sistema se realiza desde un computador conectado a la misma red, ingresando la dirección IP de la Raspberry Pi en un navegador web.

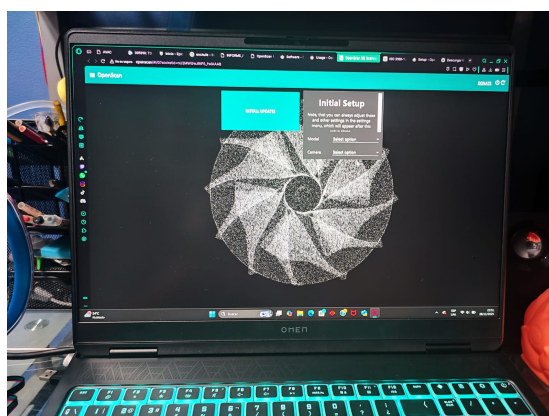


Figura 72. Interfaz web de OpenScan.[81]

Al acceder a la interfaz, se dispone de un panel de control desde el cual se pueden definir los parámetros del escaneo, como el número de fotografías por rotación, el rango de inclinación del eje tilt y la velocidad de los movimientos. Estos parámetros permiten adaptar el proceso según las características del objeto a escanear.

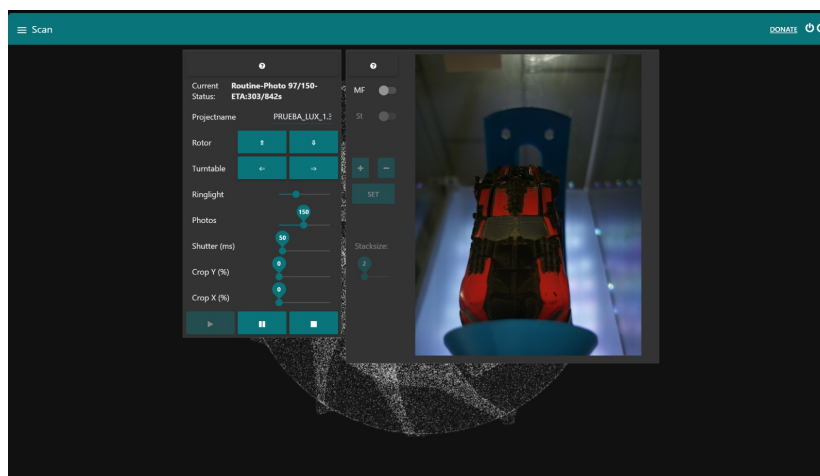


Figura 73. Panel de control de interfaz web OpenScan.[81]

Tras el inicio del escaneo, la plataforma ejecuta una secuencia automática de movimientos coordinada con la cámara, misa captura fotografías desde diversos ángulos. El proceso opera sin intervención manual, lo que asegura una distribución homogénea de las tomas y un solapamiento efectivo entre los cuadros. Este flujo de trabajo entrega un banco de imágenes muy sólido para la fase de reconstrucción digital.

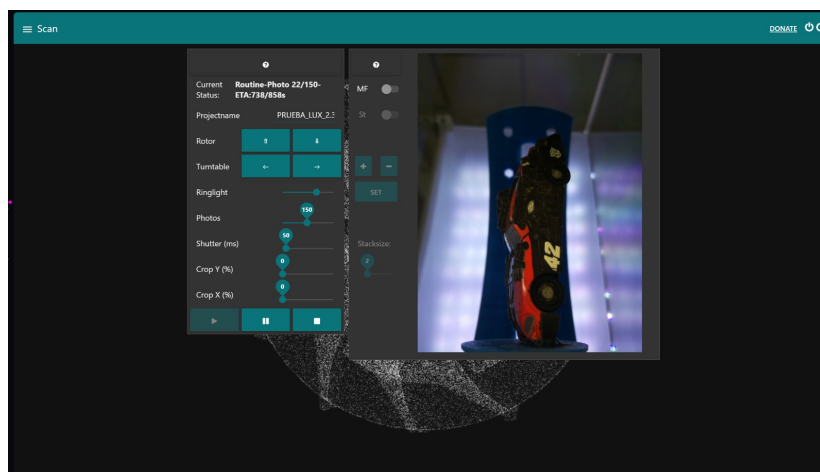


Figura 74. Captura secuencial de fotos a pieza.[81]

Una vez finalizada la captura, las imágenes se almacenan en la memoria del sistema, generalmente agrupadas en un archivo comprimido. Esto facilita su transferencia y posterior procesamiento en el software de reconstrucción tridimensional. La separación entre la adquisición de imágenes y su procesamiento permite un mayor control del flujo de trabajo y simplifica la gestión de los datos generados.

PRUEBA_LUX_5.3_0_150.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,545 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_149.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,529 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_148.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,489 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_147.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,517 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_146.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,548 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_145.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,465 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_144.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,524 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_143.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,493 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_142.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,483 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_141.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,490 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_140.jpg	12/2/2026 1:05	Archivo JPG	3,522 KB
PRUEBA_LUX_5.3_0_139.jpg	12/2/2026 1:04	Archivo JPG	3,491 KB

Figura 75. Imágenes capturadas guardadas dentro de zip que fue descargado.[81]

El uso de una interfaz web aporta flexibilidad al sistema, ya que permite controlar el proceso de escaneo de forma remota, sin necesidad de conexiones físicas adicionales. Esto facilita la operación del prototipo y permite realizar ajustes de manera rápida durante las pruebas, mejorando la interacción del usuario con el sistema desarrollado.

VI-H2. Procesamiento y reconstrucción del modelo 3D: Una vez finalizada la etapa de adquisición de imágenes, se procedió al procesamiento de los datos obtenidos mediante el software RealityScan 2.0.1, el cual permite generar modelos tridimensionales a partir de fotografías tomadas desde distintos ángulos. Esta etapa corresponde a la reconstrucción digital del objeto, donde se transforman las imágenes en una representación tridimensional que incluye geometría y textura.

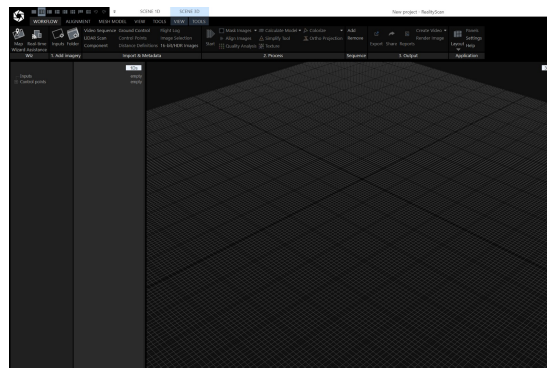


Figura 76. Inicialización de programa RealityScan2.0.1.[81]

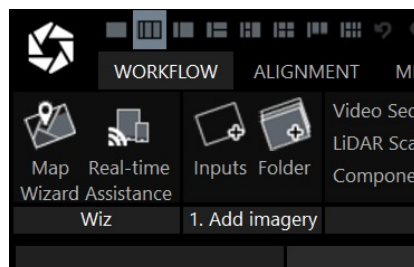


Figura 77. Ubicación en Workflow.[81]

El flujo de trabajo arranca con la ejecución de RealityScan y la apertura del entorno de trabajo. Acto seguido, la herramienta *Folder* integra las fotografías del escaneo; esta función carga el directorio completo con las capturas realizadas. Tras la carga, el software detecta el volumen de archivos y los organiza para el procesamiento.

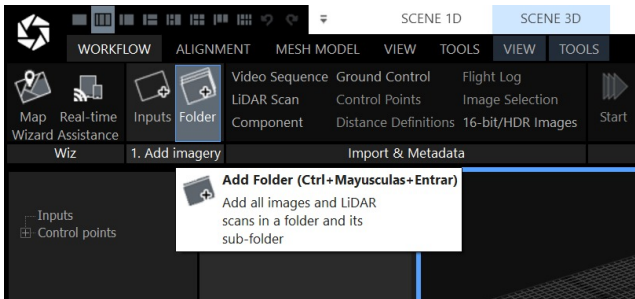


Figura 78. Uso de herramienta Folder.[81]

La siguiente fase emplea el comando *Align Images*, el cual ejecuta la alineación de las tomas a partir de puntos de coincidencia. En este paso, el programa calcula la ubicación relativa de cada fotografía y origina una nube de puntos preliminar, la cual constituye la armazón tridimensional del objeto.

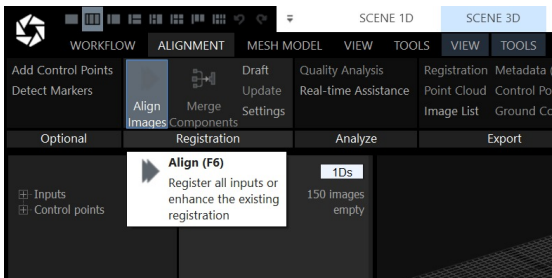


Figura 79. Uso de herramienta Align images.[81]

Tras la alineación, la herramienta *Normal Detail* construye el modelo tridimensional. Durante esta etapa, el motor de procesamiento procede a crear la geometría a partir de la nube de puntos previa, con lo que se obtiene la malla que define la anatomía de la pieza.

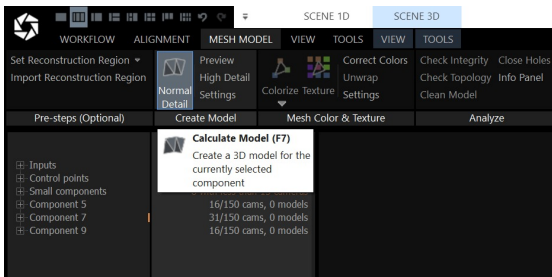


Figura 80. Uso de herramienta Normal Detail.[81]

Para concluir, se aplica la función *Texture*, misma que proyecta los datos de color de las imágenes sobre la superficie de la malla. Este paso provoca que se eleve la fidelidad visual, pues añade los matices y tonos reales del objeto original.

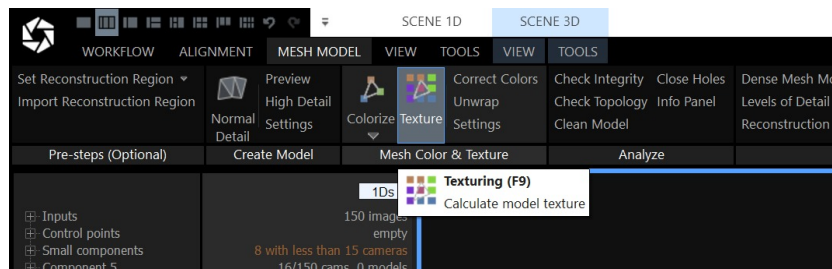


Figura 81. Uso de herramienta texture.[81]

Este proceso entrega un modelo tridimensional íntegro, que cuenta con geometría y textura listas para su exportación en diferentes formatos compatibles con entornos de diseño y visualización profesional.

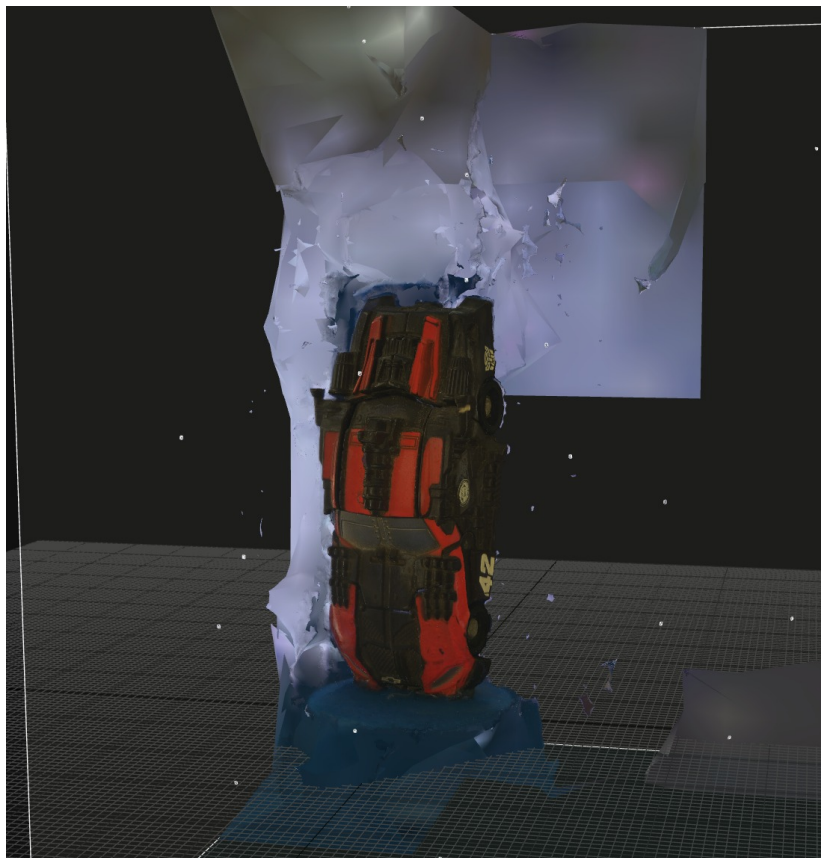


Figura 82. Objeto escaneado en formato 3D.[81]

VI-I. Pruebas del prototipo

Tras completar el ensamblaje del sistema, se ejecutó un conjunto de ensayos con el fin de examinar el desempeño del escaneo bajo distintas condiciones de operación. El foco de estas pruebas se centró en el impacto de variables como la intensidad lumínica y el volumen de fotografías en la calidad de la reconstrucción digital.

En esta fase se empleó el primer prototipo funcional, lo que sirvió para validar su comportamiento en escenarios reales. Los múltiples escaneos realizados incluyeron variaciones controladas de los parámetros de diseño, táctica que logra asegurar la obtención de datos comparables en cada sesión.

El registro de los hallazgos se realizó de forma sistemática. Se tomaron como métricas principales el nivel de iluminancia (en lux) y la cifra de imágenes que procesó el software. Con base en estas cifras, se calificaron los modelos generados para detectar el nexo entre las condiciones de captura y el producto final del escaneo.

VI-II. Criterio de evaluación de la calidad del modelo 3D: La valoración de los resultados exigió la definición de una escala cualitativa para clasificar la nitidez de la reconstrucción. Este método parte de la inspección directa del objeto 3D y analiza rasgos visuales y geométricos que inciden en su utilidad técnica.

Los criterios de examen abarcan tanto la definición de rasgos finos, como la integridad de la malla, la saturación de ruido y el parecido de la textura con la pieza original. Tales indicadores revelan si el modelo cumple con las exigencias de visualización o si posee fallos que degraden el valor del mismo.

La clasificación consta de cinco niveles de calidad. Este ordenamiento facilita el contraste entre los resultados de los diversos ensayos y ayuda a establecer la correlación entre las variables de control y el rendimiento del sistema.

Tabla IV
ESCALA DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA CALIDAD DEL MODELO 3D.

Calificación	Descripción de la calidad del modelo 3D
1	Modelo con fallas significativas. Se observan deformaciones, pérdida de geometría, huecos grandes o ausencia de detalles. La textura es deficiente o inexistente.
2	Modelo con baja calidad. Presenta ruido en la malla, zonas incompletas y pérdida de detalles importantes. La textura es poco clara o inconsistente.
3	Modelo de calidad aceptable. La geometría general es reconocible, aunque existen imperfecciones o falta de definición en algunas áreas. La textura es visible pero con limitaciones.
4	Modelo de buena calidad. Se observan detalles bien definidos, continuidad en la malla y una textura adecuada. Presenta pocas imperfecciones.
5	Modelo de alta calidad. La geometría es precisa, la malla es continua y la textura es clara y fiel al objeto original. No se aprecian defectos relevantes.

VI-I2. Pruebas de iluminancia: Para analizar la influencia de la iluminación en el proceso de escaneo, se realizaron diferentes pruebas variando la intensidad de la luz dentro de la caja de acrílico. La medición de la iluminancia se efectuó mediante el sensor BH1750, el cual permite obtener valores directos en lux, facilitando el registro de las condiciones de iluminación en cada ensayo. Este sensor fue ubicado en la base del motor, ya que este se encuentra situado enfrente del difusor de luz, permitiendo que proyecte directamente la luz al sensor.

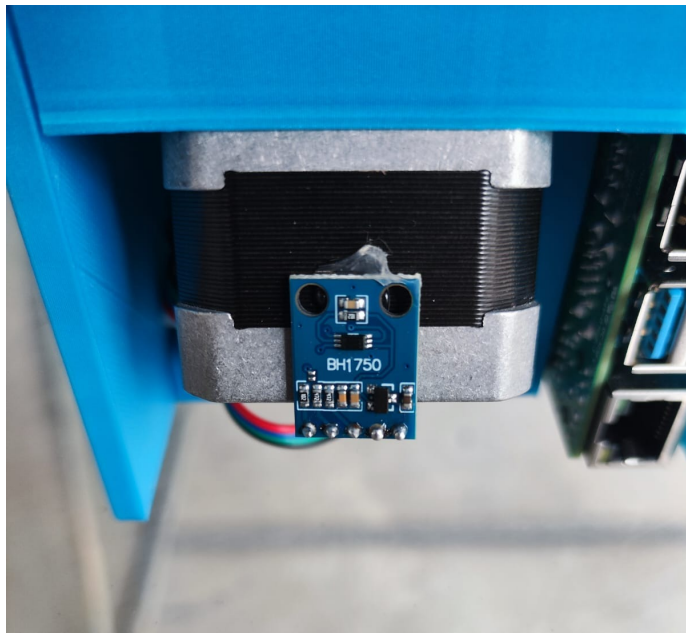


Figura 83. Ubicación de sensor de sistema de sensado de luminancia.[81]

Durante las pruebas, se ajustó la intensidad de las luces LED por medio de un control, estas tenían una regulación de hasta 5 niveles. Se registró el valor correspondiente mostrado en la pantalla LCD del sistema de sensado.



Figura 84. Ajuste de intensidad de luz de luces leds.[81]

De esta manera, se obtuvo una referencia visual inmediata del nivel de iluminación presente en el entorno de escaneo, lo cual permitió mantener un control sobre esta variable en cada ejecución.



Figura 85. LCD muestra luminancia sensada.[81]

Para cada nivel de iluminancia se realizó el proceso completo de escaneo, obteniendo un conjunto de imágenes que posteriormente fueron procesadas para generar el modelo tridimensional. El resultado obtenido fue evaluado de acuerdo con el criterio de calidad definido, permitiendo asignar una calificación a cada caso.

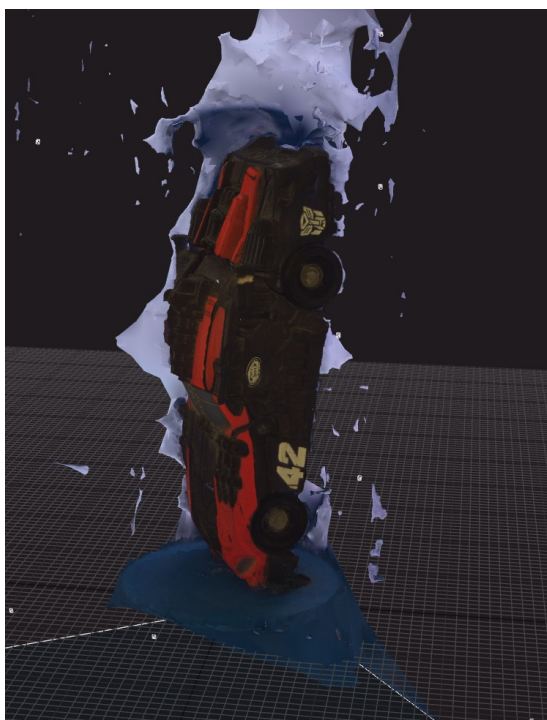


Figura 86. Objeto escaneado en formato 3D luego de primera prueba.[81]

Los valores de iluminancia y sus respectivas calificaciones fueron registrados para su posterior análisis, con el fin de identificar la relación entre la iluminación y la calidad del modelo generado.

VI-13. *Pruebas de cantidad de imágenes:* Con el propósito de evaluar la influencia de la cantidad de imágenes en la reconstrucción tridimensional, se realizaron pruebas variando el número de fotografías capturadas durante el proceso de escaneo. Este parámetro se configuró directamente desde la interfaz del sistema OpenScan, donde es posible definir la cantidad de posiciones de captura en los ejes de rotación e inclinación.

Para cada prueba, se establecieron diferentes configuraciones de captura, manteniendo constantes las condiciones de iluminación, donde se usó el tercer nivel de iluminación, con el fin de aislar el efecto de esta variable. De esta forma, se pudo observar cómo la variación en el número de imágenes influye en la calidad del modelo final.

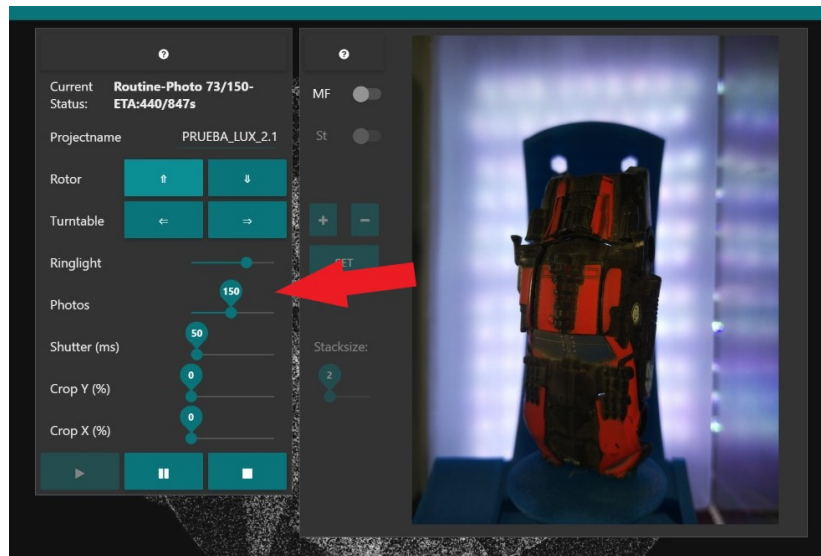


Figura 87. Parametrización de cantidad de fotos a capturar.[81]

Una vez definida la configuración, se ejecutó el proceso de escaneo de manera automática, obteniendo un conjunto de imágenes que posteriormente fueron procesadas en el software de reconstrucción. El modelo resultante fue evaluado utilizando la escala de calidad establecida, asignando una calificación a cada caso.

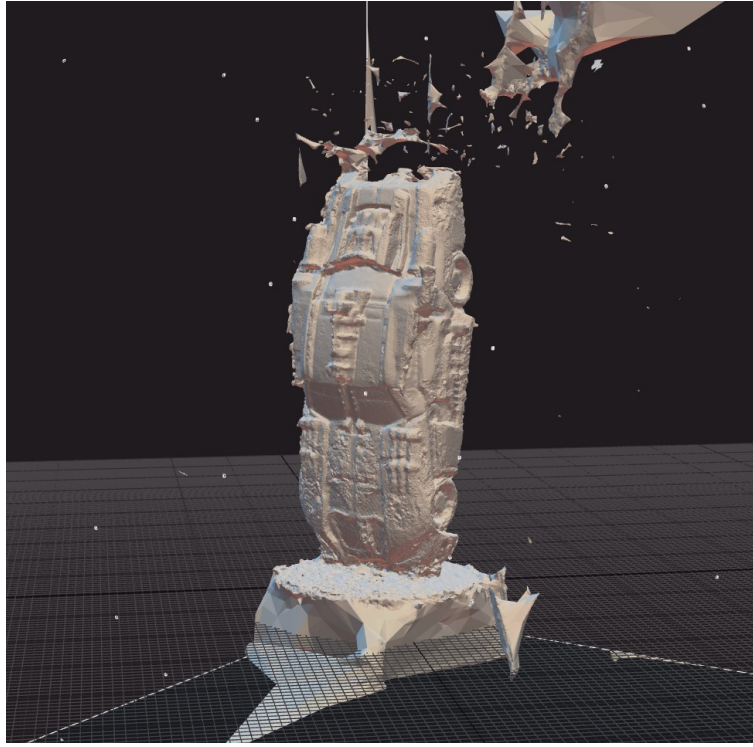


Figura 88. Objeto escaneado en formato 3D luego de tercera prueba de toma de fotos.[81]

Los datos obtenidos fueron organizados para su análisis, permitiendo establecer la relación entre la cantidad de imágenes capturadas y la calidad del modelo tridimensional generado.

VI-I4. Análisis de correlación: Con el objetivo de analizar la relación entre las variables evaluadas y la calidad del modelo tridimensional, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente permite cuantificar el grado de relación lineal entre dos variables, indicando si existe una correlación positiva, negativa o nula entre ellas.

En este trabajo, el coeficiente se utilizó para estudiar la relación entre la iluminancia (lux) y la calidad del escaneo, así como entre la cantidad de imágenes capturadas y la calidad del modelo generado. Para ello, se consideraron los valores obtenidos en cada prueba, junto con la calificación asignada según el criterio de evaluación establecido.

El coeficiente de correlación de Pearson se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

donde x_i representa los valores de la variable independiente (iluminancia o número de imágenes), y_i corresponde a la calificación del modelo, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son los promedios de cada conjunto de datos, y n es el número total de observaciones.

El valor del coeficiente r se encuentra en el intervalo $[-1, 1]$, donde valores cercanos a 1 indican una relación positiva fuerte, valores cercanos a -1 una relación negativa fuerte, y valores próximos a 0 una relación débil o inexistente.

Este análisis ayuda a identificar de manera cuantitativa el impacto de las variables estudiadas sobre la calidad del escaneo, logrando facilitar la interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas del prototipo.

VII. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los diseños y las pruebas realizadas con el prototipo de escaneo 3D. Se analizan las relaciones entre la iluminancia y la calidad del modelo generado, así como la influencia de la cantidad de imágenes en el proceso de reconstrucción. Para ello, se emplea el coeficiente de correlación de Pearson como herramienta de análisis estadístico.

VII-A. Prototipo final

Tras las fases de diseño y los ajustes mecánicos, la plataforma pan-tilt alcanzó su configuración definitiva. Este modelo incorpora las adaptaciones necesarias para su producción mediante fundición en aluminio reciclado. Durante esta etapa, se resolvieron las limitaciones del moldeo en arena: se eliminaron geometrías con socavados, se añadieron ángulos de desmoldeo y se segmentaron las piezas en secciones que facilitan tanto el colado como el montaje posterior.

La estructura final consta de una base sólida, la media luna para el movimiento de tilt, plataformas de soporte y sus respectivas tapas. Por otro lado, el diseño reserva espacio interno para la electrónica sin entorpecer la movilidad del mecanismo. La cámara, la Raspberry Pi y las tarjetas de control se integran en cavidades específicas validadas previamente en el entorno CAD. Este análisis digital sirvió para confirmar que la alineación y la compatibilidad entre las partes fuera total.

En la siguiente figura se aprecia el desglose del prototipo, donde se observa la jerarquía de las piezas y su ubicación dentro del sistema.

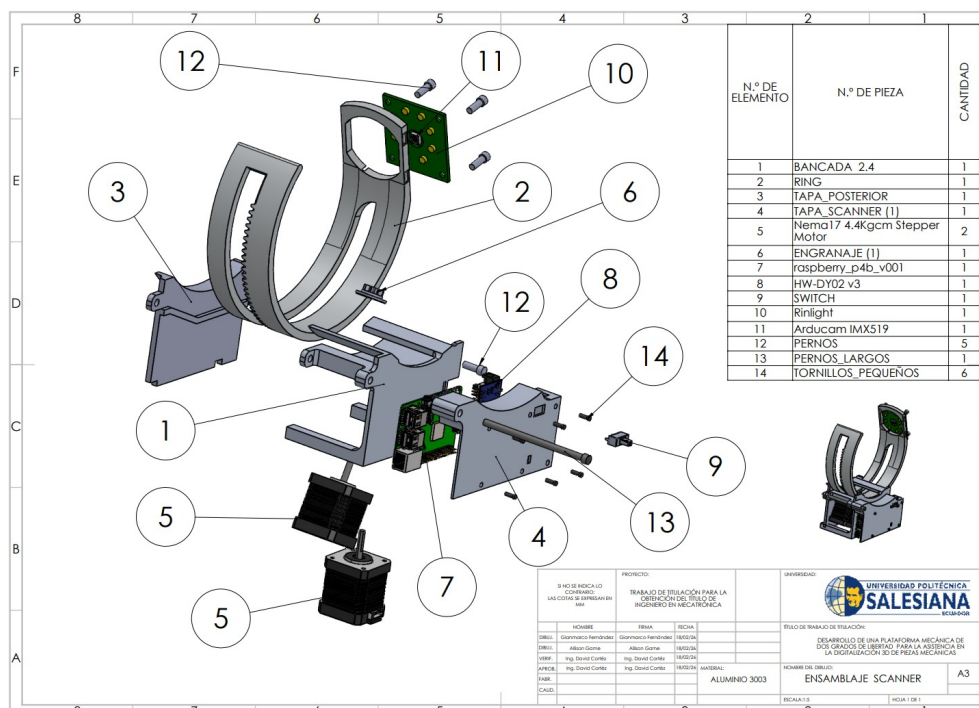


Figura 89. Lámina de la vista explosionada del Scanner [81].

VII-B. Configuración final del escáner 3D

El equipo de escaneo 3D alcanzó su forma definitiva al acoplar la plataforma mecánica pan-tilt con el bloque electrónico y óptico. La arquitectura del sistema agrupa una cámara Arducam IMX519, la Raspberry Pi 4B, los controladores de motor, el esquema de iluminación y el sensor de iluminancia. Esta unión de hardware facilitó la automatización del barrido, con lo cual se obtuvo una cobertura angular completa y un entorno de captura bajo control.

Durante el montaje, la prioridad fue la ubicación precisa de cada pieza para dar estabilidad al conjunto y alinear la cámara frente al objeto. Tras fijar los componentes, se realizaron pruebas de funcionamiento en los sistemas de mando y adquisición de datos. Estas verificaciones aseguran que el escaneo se ejecute con fluidez, de forma continua y con resultados que se pueden repetir.

En la siguiente figura se aprecia el sistema de escaneo 3D en su totalidad, con etiquetas que indican los módulos principales de su estructura.

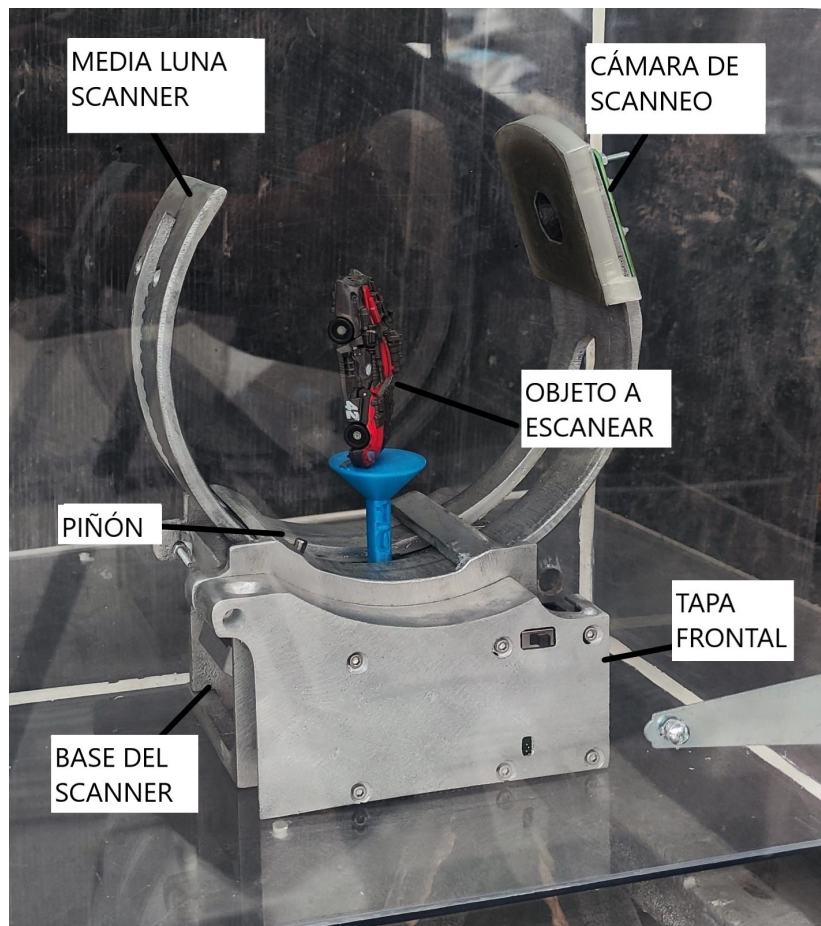


Figura 90. Sistema de escaneo 3D final con identificación de sus principales componentes. [81]

VII-C. Resultados según iluminancia

Previo al análisis consolidado de los datos, se generaron tablas individuales correspondientes a cada nivel de iluminancia evaluado durante las pruebas experimentales. En cada uno de estos niveles se realizaron veinte mediciones de luz mediante el sensor BH1750, teniendo un total de 100 pruebas realizadas, registrando los valores obtenidos en lux junto con la calificación asignada al modelo 3D generado. Estas tablas posibilitan observar la variabilidad de las mediciones dentro de un mismo nivel de iluminación y facilitan la obtención de valores promedio, los cuales fueron utilizados posteriormente para el análisis de correlación. A continuación, se presentan las tablas correspondientes a cada nivel de iluminancia, obtenidas mediante Microsoft Excel.

Tabla V
RESULTADOS DE ILUMINANCIA - NIVEL 1

N°	1	2	3	4	5	PROM	CALIFICACIÓN
1	398	402	405	399	401	401	1
2	395	397	400	396	398	397,2	1
3	404	406	403	402	405	404	1,1
4	390	392	395	393	391	392,2	0,9
5	401	403	400	402	399	401	1
6	397	399	396	398	400	398	1
7	405	407	404	406	403	405	1,1
8	393	395	392	394	396	394	0,9
9	399	401	398	400	402	400	1
10	402	404	403	401	405	403	1,1
11	396	398	395	397	399	397	1
12	390	393	392	391	394	392	0,9
13	404	406	405	407	403	405	1,2
14	398	400	399	397	401	399	1
15	395	397	394	396	398	396	0,9
16	402	403	401	404	400	402	1,3
17	391	393	390	392	394	392	1
18	399	401	398	400	402	400	0,9
19	403	405	402	404	406	404	1,4
20	397	399	396	398	400	398	1,1
Promedio						399,02	1,04

Tabla VI
RESULTADOS DE ILUMINANCIA - NIVEL 2

Nº	1	2	3	4	5	PROM	CALIFICACIÓN
1	490	492	489	491	493	491	2,5
2	485	487	486	488	489	487	2,1
3	493	495	492	494	491	493	2,6
4	480	482	481	483	484	482	1,9
5	488	490	489	487	491	489	2,2
6	486	488	485	487	489	487	2,1
7	494	496	493	495	492	494	2,7
8	482	484	481	483	485	483	2
9	489	491	488	490	492	490	2,3
10	491	493	490	492	494	492	2,4
11	487	489	486	488	490	488	2,1
12	481	483	480	482	484	482	1,9
13	493	495	492	494	491	493	2,6
14	488	490	487	489	491	489	2,2
15	485	487	484	486	488	486	2
16	490	492	489	491	493	491	2,5
17	482	484	481	483	485	483	2
18	489	491	488	490	492	490	2,3
19	494	496	493	495	492	494	2,7
20	487	489	486	488	490	488	2,1
Promedio						488,6	2,26

Tabla VII
RESULTADOS DE ILUMINANCIA - NIVEL 3

Nº	1	2	3	4	5	PROM	CALIFICACIÓN
1	565	568	564	567	569	566,6	3,4
2	540	542	539	541	543	541	2,9
3	572	574	571	573	575	573	3,5
4	548	550	547	549	551	549	3
5	560	562	559	561	563	561	3,2
6	555	557	554	556	558	556	3,1
7	570	572	569	571	573	571	3,4
8	545	547	544	546	548	546	3
9	558	560	557	559	561	559	3,2
10	562	564	561	563	565	563	3,3
11	552	554	551	553	555	553	3,1
12	546	548	545	547	549	547	3
13	571	573	570	572	574	572	3,5
14	559	561	558	560	562	560	3,2
15	550	552	549	551	553	551	3,1
16	565	567	564	566	568	566	3,4
17	545	547	544	546	548	546	3
18	558	560	557	559	561	559	3,2
19	572	574	571	573	575	573	3,5
20	553	555	552	554	556	554	3,1
Promedio						558,33	3,205

Tabla VIII
RESULTADOS DE ILUMINANCIA - NIVEL 4

Nº	1	2	3	4	5	PROM	CALIFICACIÓN
1	655	657	654	656	658	656	4,1
2	650	652	651	653	654	652	3,9
3	658	660	657	659	656	658	4,2
4	653	655	652	654	656	654	4
5	656	658	655	657	659	657	4,1
6	652	654	651	653	655	653	4
7	659	661	658	660	657	659	4,2
8	650	652	649	651	653	651	3,9
9	655	657	654	656	658	656	4,1
10	657	659	656	658	660	658	4,2
11	653	655	652	654	656	654	4
12	651	653	650	652	654	652	3,9
13	658	660	657	659	661	659	4,2
14	655	657	654	656	658	656	4,1
15	652	654	651	653	655	653	4
16	656	658	655	657	659	657	4,1
17	650	652	649	651	653	651	3,9
18	655	657	654	656	658	656	4,1
19	659	661	658	660	662	660	4,3
20	653	655	652	654	656	654	4
Promedio						655,3	4,065

Tabla IX
RESULTADOS DE ILUMINANCIA - NIVEL 5

Nº	1	2	3	4	5	PROM	CALIFICACIÓN
1	775	778	774	776	779	776,4	4,7
2	770	772	769	771	773	771	4,2
3	780	782	779	781	778	780	4,8
4	765	767	764	766	768	766	4,1
5	773	775	772	774	776	774	4,4
6	768	770	767	769	771	769	4,2
7	779	781	778	780	782	780	4,8
8	766	768	765	767	769	767	4,1
9	772	774	771	773	775	773	4,4
10	776	778	775	777	779	777	4,6
11	769	771	768	770	772	770	4,2
12	765	767	764	766	768	766	4,1
13	780	782	779	781	783	781	4,9
14	773	775	772	774	776	774	4,4
15	768	770	767	769	771	769	4,2
16	775	777	774	776	778	776	4,6
17	766	768	765	767	769	767	4,1
18	772	774	771	773	775	773	4,4
19	779	781	778	780	782	780	4,8
20	769	771	768	770	772	770	4,2
Promedio						772,97	4,41

A partir de los valores promedio obtenidos en cada nivel de iluminancia, se construye la siguiente tabla resumen que relaciona la iluminancia medida en lux con la calificación del modelo 3D correspondiente.

Tabla X
RELACIÓN ENTRE ILUMINANCIA PROMEDIO Y CALIFICACIÓN

LUX	CALIFICACIÓN
399,02	1,04
488,60	2,26
558,33	3,21
655,30	4,07
772,97	4,41

Con el fin de visualizar la relación entre la iluminancia y la calidad del modelo 3D obtenido, se generó la siguiente gráfica de dispersión, en la cual se representan los valores promedio de iluminancia en lux frente a la calificación asignada a cada escaneo. Este tipo de representación admite identificar de manera más clara la tendencia de los datos, mismoq que logra evidenciar si existe una relación directa entre el incremento de la iluminación y la mejora en la calidad del modelo reconstruido.

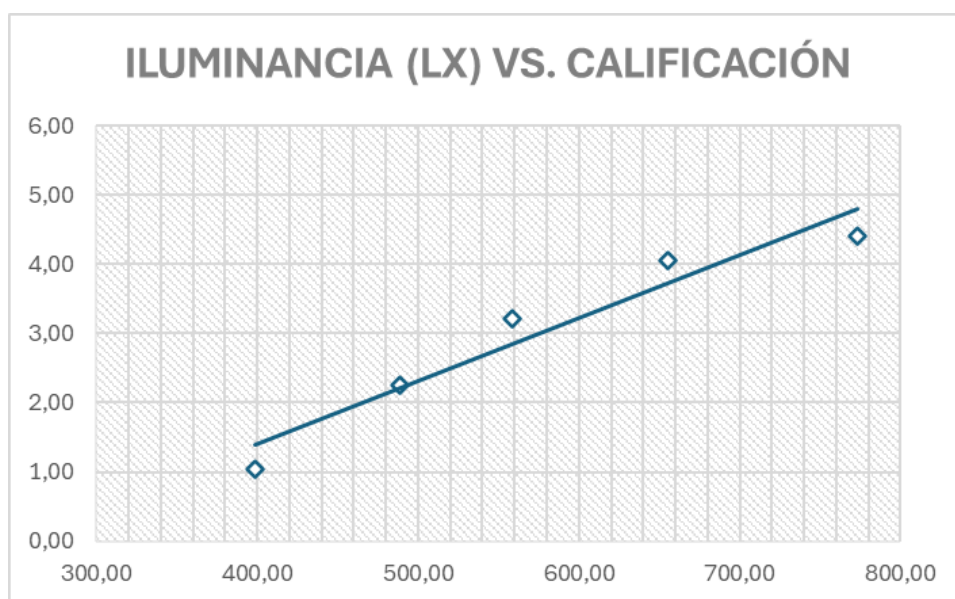


Figura 91. Relación entre iluminancia y calidad del escaneo.

Para la determinación del coeficiente de correlación, se utilizó la función *COEF.DE.CORREL* de Microsoft Excel, la cual permite calcular directamente la relación entre dos conjuntos de datos. En este caso, se emplearon los valores de iluminancia (lx) y las calificaciones obtenidas en cada prueba, conforme a la siguiente expresión:

$$r = \text{COEF.DE.CORREL}(X, Y) \quad (5)$$

El valor obtenido para el coeficiente de correlación fue:

$$r = 0,965 \quad (6)$$

Con el fin de detallar el de cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, se realiza también una resolución manual a partir de los datos experimentales de iluminancia y calificación. Para ello, se construye una tabla en la que se incluyen las desviaciones respecto a los promedios, sus productos cruzados y los términos cuadrados requeridos para la aplicación de la ecuación. A continuación, se muestra la tabla de cálculo.

Tabla XI
CÁLCULO DE CORRELACIÓN ENTRE ILUMINANCIA Y CALIFICACIÓN

LUX	CALIFICACIÓN	(x - $\bar{x}$)	(y - $\bar{y}$)	(x - $\bar{x}$)(y - $\bar{y}$)	(x - $\bar{x}$) ²	(y - $\bar{y}$) ²
399,02	1,04	-175,82	-1,96	343,911744	30914,08	3,83
488,60	2,26	-86,24	-0,74	63,475584	7438,03	0,54
558,33	3,21	-16,51	0,21	-3,451426	272,71	0,04
655,30	4,07	80,46	1,07	86,007464	6473,17	1,14
772,97	4,41	198,13	1,41	280,150164	39253,91	2,00
Σ				770,09	84351,90	7,55

Resolución de coeficiente de relación de Pearson:

$$r = \frac{770,09}{\sqrt{(84351,9)(7,55)}} \approx 0,965 \quad (7)$$

El valor obtenido indica una correlación positiva muy fuerte entre la iluminancia y la calidad del escaneo. Esto evidencia que, a medida que aumenta la intensidad de la iluminación, mejora la calidad del modelo tridimensional generado. Sin embargo, se observa que la relación tiende a estabilizarse en los niveles más altos de iluminancia, lo que sugiere la existencia de un rango óptimo para el proceso de captura.

VII-D. Resultados según cantidad de fotos capturadas

Con el objetivo de analizar la influencia de la cantidad de imágenes capturadas en la calidad del modelo 3D, se realizaron diferentes pruebas variando el número de fotografías tomadas durante el proceso de escaneo. En cada caso, se mantuvieron constantes las condiciones de iluminación y configuración del sistema, con el fin de aislar el efecto de esta variable. La calidad del modelo obtenido se evaluó mediante la escala definida previamente, permitiendo establecer una relación entre la cantidad de imágenes y el resultado final del escaneo.

Para cada configuración de cantidad de imágenes, se realizaron varias iteraciones con el fin de obtener resultados más representativos. Los datos fueron organizados en una tabla, donde se registra la cantidad de imágenes capturadas y la calificación asignada al modelo 3D generado en cada prueba. A continuación, se presentan la tabla correspondiente.

Tabla XII
RESULTADOS DE CALIFICACIÓN SEGÚN CANTIDAD DE FOTOS

Nº	CANT. FOTOS	CALIFICACIÓN
1	60	1.7
2	60	1.8
3	60	1.9
4	60	1.6
5	60	1.7
6	120	3.3
7	120	3.4
8	120	3.5
9	120	3.2
10	120	3.3
11	180	3.9
12	180	4.0
13	180	3.8
14	180	4.1
15	180	3.9
16	240	4.6
17	240	4.7
18	240	4.8
19	240	4.5
20	240	4.6
21	300	4.3
22	300	4.4
23	300	4.2
24	300	4.5
25	300	4.3

Con el fin de visualizar la relación entre la cantidad de imágenes capturadas y la calidad del modelo 3D, se presenta la siguiente gráfica de dispersión. En ella se representan los valores promedio de ambas variables, permitiendo identificar la tendencia del comportamiento del sistema frente a cambios en el número de fotografías utilizadas durante el escaneo.

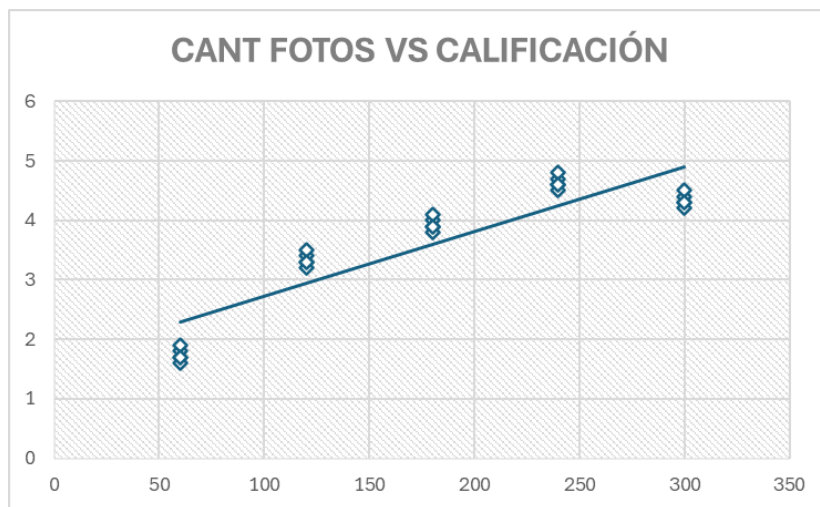


Figura 92. Relación entre cantidad de fotos capturadas y calidad del escaneo.

Para el cálculo del coeficiente de correlación, se empleó la función *COEF.DE.CORREL* de Microsoft Excel, la cual permite determinar de forma directa la relación entre dos conjuntos de datos. En este caso, se utilizaron los valores correspondientes a la cantidad de imágenes capturadas y las calificaciones asignadas a los modelos 3D obtenidos en cada prueba, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$r = \text{COEF.DE.CORREL}(X, Y) \quad (8)$$

El valor obtenido para el coeficiente de correlación fue:

$$r = 0,89 \quad (9)$$

Para determinar cuantitativamente la relación entre la cantidad de imágenes y la calidad del modelo 3D, a su vez, se procede a calcular el coeficiente de correlación de Pearson. Para ello, se organiza la información en una tabla auxiliar donde se incluyen las desviaciones respecto a los valores promedio, así como los productos y términos cuadrados necesarios para la aplicación de la fórmula.

Tabla XIII
CÁLCULO DE CORRELACIÓN ENTRE CANTIDAD DE FOTOS Y CALIFICACIÓN

CANT FOTOS	CALIFICACIÓN	(x - $\bar{x}$)	(y - $\bar{y}$)	(x - $\bar{x}$)(y - $\bar{y}$)	(x - $\bar{x}$) ²	(y - $\bar{y}$) ²
60	1,7	-120,00	-1,9	228	14400,00	3,61
60	1,8	-120,00	-1,8	216	14400,00	3,24
60	1,9	-120,00	-1,7	204	14400,00	2,89
60	1,6	-120,00	-2,0	240	14400,00	4,00
60	1,7	-120,00	-1,9	228	14400,00	3,61
120	3,3	-60,00	-0,3	18	3600,00	0,09
120	3,4	-60,00	-0,2	12	3600,00	0,04
120	3,5	-60,00	-0,1	6	3600,00	0,01
120	3,2	-60,00	-0,4	24	3600,00	0,16
120	3,3	-60,00	-0,3	18	3600,00	0,09
180	3,9	0,00	0,3	0	0,00	0,09
180	4,0	0,00	0,4	0	0,00	0,16
180	3,8	0,00	0,2	0	0,00	0,04
180	4,1	0,00	0,5	0	0,00	0,25
180	3,9	0,00	0,3	0	0,00	0,09
240	4,6	60,00	1,0	60	3600,00	1,00
240	4,7	60,00	1,1	66	3600,00	1,21
240	4,8	60,00	1,2	72	3600,00	1,44
240	4,5	60,00	0,9	54	3600,00	0,81
240	4,6	60,00	1,0	60	3600,00	1,00
300	4,3	120,00	0,7	84	14400,00	0,49
300	4,4	120,00	0,8	96	14400,00	0,64
300	4,2	120,00	0,6	72	14400,00	0,36
300	4,5	120,00	0,9	108	14400,00	0,81
300	4,3	120,00	0,7	84	14400,00	0,49
Σ				1950	180000,00	26,62

Resolución de coeficiente de relación de Pearson:

$$r = \frac{1950}{\sqrt{(180000)(26,62)}} \approx 0,89 \quad (10)$$

El valor obtenido del coeficiente de correlación, $r = 0,89$, indica la existencia de una correlación positiva fuerte entre la cantidad de imágenes capturadas y la calidad del modelo 3D. Este resultado sugiere que, a medida que se incrementa el número de fotografías durante el proceso de escaneo, se mejora la reconstrucción del modelo, ya que se dispone de mayor información para la alineación de imágenes y la generación de la nube de puntos.

No obstante, aunque la relación es claramente positiva, el valor de correlación es ligeramente inferior al obtenido en el análisis de iluminancia, lo que indica que la cantidad de imágenes, si bien es un factor importante, no es el único parámetro que influye en la calidad del escaneo. Factores como la iluminación, la estabilidad del sistema y las características de la superficie del objeto también desempeñan un papel muy importante en el resultado final.

VII-E. Evaluación de la condición óptima de escaneo

Los resultados de las pruebas experimentales muestran que la iluminancia y el volumen de imágenes capturadas inciden de forma directa en la calidad del modelo 3D. Tras aplicar el análisis de correlación de Pearson, se detectó que un vínculo positivo entre estas variables y la puntuación de los modelos. Los registros confirman que la fidelidad visual llega a su punto máximo cuando se emplean niveles altos de luz hasta cierto punto y un mayor número de fotografías.

Con base en este hallazgo, se fijó el nivel de iluminancia más alto que se posee y un total de 300 capturas como los parámetros para el desempeño superior del equipo. Bajo este esquema, se ejecutaron varias iteraciones de escaneo sin alterar el resto de las variables. El propósito fue verificar si el sistema mantenía la coherencia en sus resultados a través del tiempo.

Los datos recolectados en cada sesión aparecen en la siguiente, donde figura la calificación del modelo 3D generado en cada ciclo bajo condiciones de operación favorables.

Tabla XIV
ITERACIONES DE ESCANEO BAJO CONDICIONES ÓPTIMAS (NIVEL 5 DE ILUMINANCIA Y 300 CAPTURAS)

Iteración	LUX	CANT. FOTOS	CALIFICACIÓN
1	772	300	4,6
2	775	300	4,7
3	769	300	4,5
4	778	300	4,7
5	771	300	4,6
6	776	300	4,8
7	768	300	4,4
8	774	300	4,6
9	770	300	4,5
10	779	300	4,8
11	767	300	4,4
12	773	300	4,6
13	776	300	4,7
14	769	300	4,5
15	780	300	4,8

VII-F. Cálculo de la eficiencia del sistema

Para determinar el rendimiento del equipo en su mejor escenario de trabajo, se calcula la eficiencia según la puntuación lograda frente al valor máximo teórico. Este cálculo se detalla en la siguiente expresión:(11):

$$\eta = \frac{\bar{y}}{y_{\text{máx}}} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

- η es la eficiencia del sistema (%)
- $\bar{y}$ es el promedio de las calificaciones obtenidas
- $y_{\text{máx}}$ es la calificación máxima posible (5)

Las calificaciones obtenidas en las 15 iteraciones fueron:

$$4,6, 4,7, 4,5, 4,7, 4,6, 4,8, 4,4, 4,6, 4,5, 4,8, 4,4, 4,6, 4,7, 4,5, 4,8 \quad (12)$$

El promedio de las calificaciones se calcula como:

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{69,2}{15} = 4,61 \quad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación de eficiencia:

$$\eta = \frac{4,61}{5} \times 100 \quad (14)$$

$$\eta = 92,2\% \quad (15)$$

Por lo tanto, la eficiencia del sistema bajo condiciones óptimas de operación es:

$$\boxed{\eta = 92,2\%} \quad (16)$$

Este resultado indica que el sistema presenta un alto nivel de desempeño y mantiene una respuesta consistente, incluso ante ligeras variaciones en las condiciones de iluminancia.

VIII. CRONOGRAMA

La planificación del proyecto, desglosada por semanas, se expone en el gráfico a continuación. En él se observa la ruta de trabajo desde la fase inicial hasta la validación final.

TAREA	OCTUBRE		NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEB		
	\$1	\$2	\$3	\$4	\$5	\$6	\$7	\$8	\$9	\$10	\$11	\$12	\$13	\$14	\$15	\$16	\$17
TAREA																	
Revisión de literatura y planificación																	
Investigación sobre plataformas de escaneo 3D de bajo costo																	
Revisión de software de escaneo compatible y configuración																	
Planificación general del desarrollo del proyecto																	
Diseño 3D del mecanismo de dos grados de libertad en plataforma de diseño para obtención de planos y codificación																	
Modelado CAD de la plataforma y adquisición de piezas de aluminio para corte en CNC																	
Simulación estática según material seleccionado																	
Fabricación de componentes (corte y moldeado en CNC)																	
Ensamblaje preliminar de estructura base																	
Instalación de motores, servos, sensores y cableado																	
Montaje del sistema de control sobre la plataforma																	
Integración con sistema de escaneo 3D y montaje de cámara/sensor																	
Ejecución de programación de controladores y pruebas																	
Pruebas de respuesta y estabilidad de escáner																	
Prueba de digitalización con una pieza mecánica real																	
Comparación con modelo digital esperado y registro de resultados																	
Culminación y presentación de informe final																	
Presentación final del proyecto ante el jurado																	

Figura 93. Cronograma

IX. PRESUPUESTO

El desglose de los costos previstos para el desarrollo del proyecto figura en la tabla posterior. Este listado detalla la inversión requerida en materiales, componentes electrónicos y procesos de fabricación.

Tabla XV
PRESUPUESTO REFERENCIAL DEL PROYECTO.

Nombre del elemento	Descripción	Cant.	Precio Unitario	Valor total
OpenScan Benchy	Unidad	1	\$ -	\$ -
Pi-Shield V1 pre-soldado y probado y anillo de luz	set	1	\$ 65,00	\$ 65,00
Módulo de polarizador cruzado impreso en 3D para Scanner	Unidad	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Arducam IMX519 de 16 Mpx con cables de 15 cm y 50 cm	Unidad	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Motor paso a paso Nema 17 de 13 Ncm con cable de 1 m	Unidad	1	\$ 17,00	\$ 17,00
Motor paso a paso Nema 17 de 40 Ncm con cable de 1 m	Unidad	1	\$ 22,00	\$ 22,00
Controladores de motor paso a paso A4988	set	2	\$ 5,00	\$ 10,00
Fuente de alimentación de 12 V/2,5A con enchufe europeo	Unidad	1	\$ 16,00	\$ 16,00
Piezas pequeñas (tornillos de nailon M2, tornillos metálicos M3, tuercas, pernos)	set	1	\$ 25,00	\$ 25,00
Raspberry Pi 4B de 2 GB con tarjeta micro SD de 64 GB y firmware preinstalado (plug and play)	set	1	\$ 85,00	\$ 85,00
Piezas impresas en 3D en PLA Prusa-ment azul azur	set	1	\$ 96,00	\$ 96,00
Aluminio reciclado (Estimado)	Global	1	\$ 35,00	\$ 35,00
Sistema de Iluminancia	Global	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Caja de acrílico y M.O.	Global	1	\$ 30,00	\$ 50,00
SUBTOTAL				\$ 506,00
Transporte (Estimado)	Global	1	\$ 35,00	\$ 35,00
Importación	Global	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Mano de obra	Horas	200	\$ 2,00	\$ 400,00
SUBTOTAL COSTOS LOGÍSTICOS				\$ 455,00
TOTAL				\$ 961,00

X. CONCLUSIONES

El desarrollo de la plataforma mecánica de dos grados de libertad (*pan-tilt*) validó la viabilidad de un sistema de escaneo 3D de bajo costo a partir de materiales reciclados y componentes electrónicos de fácil acceso. La fabricación de piezas mediante fundición de aluminio reciclado resultó en una alternativa funcional, con estructuras resistentes que soportan el movimiento controlado del conjunto.

La automatización de la captura, producto de la integración entre la Raspberry Pi, motores paso a paso y la interfaz de OpenScan, aseguró trayectorias controladas y repetibles. Esta precisión favoreció el solapamiento de las tomas y redujo los errores propios de la manipulación manual, lo que elevó la calidad de la reconstrucción digital.

El análisis de la iluminancia reveló una correlación positiva muy fuerte con la nitidez del modelo 3D, con un coeficiente de Pearson de $r = 0,965$. Tal hallazgo ratifica que la luz es un factor determinante en la fotogrametría, pues incide de forma directa en la captura de rasgos finos, la mitigación de reflejos y la generación precisa de la nube de puntos.

Por otra parte, el estudio sobre el volumen de capturas mostró una correlación positiva fuerte con la calidad del modelo ($r = 0,89$). El dato señala que un número elevado de fotografías beneficia la reconstrucción al aportar más información para la alineación. No obstante, se observó que, tras alcanzar un umbral específico, el aumento de imágenes no genera mejoras proporcionales; este fenómeno sugiere un punto de equilibrio entre la calidad visual y el tiempo de cómputo.

Por otro lado, el examen de eficiencia bajo el escenario de mayor iluminación y un muestreo de 300 capturas arrojó un rendimiento alto y estable. Tras completar las iteraciones de prueba, la puntuación media alcanzó los 4,61 de un máximo de 5 puntos, cifra que se traduce en una efectividad del 92,2 %. Este dato ratifica la solidez del equipo ante cambios leves en la luz ambiente.

Los resultados llevan a concluir que el binomio entre una iluminación óptima y una cifra de imágenes equilibrada asegura el éxito del escaneo. Asimismo, el proyecto demostró la posibilidad de poner en marcha un sistema funcional y replicable en entornos educativos con presupuestos limitados, con un desempeño satisfactorio en la digitalización de piezas mecánicas.

En definitiva, este trabajo expone que el uso de tecnologías accesibles y procesos de fabricación locales da lugar a soluciones eficientes en el campo de la ingeniería. Esta aproximación fomenta la innovación y la sostenibilidad en contextos donde los recursos son escasos.

XI. RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros, se plantea la evaluación de cámaras con mayor resolución o sensores ópticos especializados. Esta mejora apunta a la obtención de modelos con un nivel de detalle superior, con énfasis en piezas de geometría compleja o superficies de baja textura.

También se sugiere explorar sistemas de calibración automática para la cámara y el entorno de escaneo. Una configuración técnica precisa reduce los errores geométricos y eleva la exactitud en la reconstrucción tridimensional.

Respecto al proceso de captura, conviene realizar estudios específicos sobre la cifra óptima de imágenes para cada tipo de objeto. En este análisis deben figurar factores como la complejidad de la forma y el tiempo de cómputo, con el propósito de maximizar el rendimiento del sistema.

Desde la perspectiva mecánica, la ruta de mejora incluye el perfeccionamiento de las piezas fundidas. El uso de tolerancias más estrictas y acabados superficiales controlados aporta una mayor estabilidad y durabilidad al conjunto en aplicaciones de larga duración.

Por último, se propone la integración total del escaneo y la reconstrucción en una plataforma única. Este desarrollo daría lugar a una interfaz centralizada para la captura y el procesamiento de los modelos 3D, lo que agiliza el uso del sistema en laboratorios educativos y disminuye la necesidad de herramientas externas.

REFERENCIAS

- [1] D. Cortez Saravia, C. Reyes-López, V. Gressely-Aspiazú y B. Vargas-Caballero, «Development of a Virtual Reality Environment Applied to Work in Cold Environments for the Reduction of Related Occupational Risks,» en abr. de 2025, págs. 437-448, ISBN: 978-3-031-87064-4. DOI: 10.1007/978-3-031-87065-1_40.
- [2] Ministerio de Educación del Ecuador, «Informe de Gestión Institucional y Financiamiento Educativo 2023-2024,» Ministerio de Educación del Ecuador, inf. téc., 2024, Datos sobre financiamiento y presupuestos en instituciones educativas públicas. dirección: <https://educacion.gob.ec/informes-de-gestion/>.
- [3] Instituto Nacional de Evaluación Educativa (INEVAL), «Reporte de Infraestructura y Recursos Educativos en Ecuador,» INEVAL, inf. téc., 2023, Informe con estadísticas sobre recursos y limitaciones presupuestarias en colegios y unidades educativas. dirección: <https://www.evaluacion.gob.ec/reportes-infraestructura/>.
- [4] M. A. Özçelik, «The Optical Measurement Susceptibility of the Photodiode and LDR Light Sensors,» Gaziantep University, Technical Science Department, inf. téc., 2015, Analysis of photodiode and LDR responses to varying light intensity. dirección: Available%20from%20DergiPark%20article.
- [5] F. Remondino y S. El-Hakim, «Image-based 3D Modelling: A Review,» *The Photogrammetric Record*, vol. 21, n.º 115, págs. 269-291, 2006. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x.
- [6] X. Xiang et al., «Mobile3DScanner: An online 3D scanner for high-quality object reconstruction with a mobile device,» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 27, n.º 11, págs. 4245-4255, 2021.
- [7] B. Wagner, P. Stüber, T. Wissel, R. Bruder, A. Schweikard y F. Ernst, «Accuracy analysis for triangulation and tracking based on time-multiplexed structured light,» *Medical Physics*, vol. 41, n.º 8Part1, pág. 082701, 2014.
- [8] O. Arold, S. Ettl, F. Willomitzer y G. Häusler, «Hand-guided 3D surface acquisition by combining simple light sectioning with real-time algorithms,» *arXiv preprint arXiv:1401.1946*, 2014.
- [9] S. Lyubomirov, S. Asenov, D. Tokmakov, H. Kanevski, D. Shehova y S. Petrova, «Case Study of 3D Scanning and Processing to Create Virtual 3D Plant Objects For Education,» en *2023 31st National Conference with International Participation (TELECOM)*, IEEE, 2023, págs. 1-6.
- [10] X. Cheng et al., «High-accuracy globally consistent surface reconstruction using fringe projection profilometry,» *Sensors*, vol. 19, n.º 3, pág. 668, 2019.
- [11] J. J. Park, P. Florence, J. Straub, R. Newcombe y S. Lovegrove, «DeepSDF: Learning continuous signed distance functions for shape representation,» en *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, págs. 165-174.
- [12] Q. Zhou, J. Zuo, W. Kang y M. Ren, «High-Precision 3D Reconstruction in Complex Scenes via Implicit Surface Reconstruction Enhanced by Multi-Sensor Data Fusion,» *Sensors*, vol. 25, n.º 9, pág. 2820, 2025.
- [13] Matter & Form, *How 3D Scanning is Transforming Education for both Teachers and Students*, <https://www.matterandform.net/blogs/news/how-3d-scanning-is-transforming-education-for-both-teachers-and-students>, 2018.
- [14] Formlabs, *3D Printing and Scanning in Education*, <https://formlabs.com/blog/3d-printing-and-scanning-in-education/>, 2023.
- [15] Techtarget, *Affordable 3D Scanning Solutions*, <https://www.techtargget.com/whatis/definition/3D-scanning>, 2022.
- [16] Sculpteo, *Comparison of 3D Scanners: Features and Costs*, <https://www.sculpteo.com/en/compare/3d-scanners/>, 2023.

- [17] Makerbot, *Integrating 3D Scanning in the Classroom*, <https://www.makerbot.com/stories/education/3d-scanning-classroom/>, 2021.
- [18] International Aluminium Institute, *Aluminium Recycling Saves 95 % of the Energy Needed for Primary Aluminium Production*, <https://international-aluminium.org/statistics/energy/>, Primary aluminium requires 186 GJ/t, recycled only 8.3 GJ/t, 2024.
- [19] International Aluminium Institute, *Greenhouse Gas Benefits of Aluminium Recycling*, <https://international-aluminium.org/statistics/emissions/>, GHG emissions: 0.52 t CO₂e/t recycled vs 15.1 t CO₂e/t primary, 2024.
- [20] M. W. Rashid, F. Fuziana, E. Mohamad, M. R. Saleh, T. Ito y T. Moriga, «Aluminium Alloy Recycling for Sustainable Manufacturing,» *JSME Conference Proceedings*, 2016, Shows mechanical viability of recycled aluminium alloys.
- [21] A. Leach y C. Jones, «Scaling Digital Fabrication for Technical Education,» *Journal of Technical Education and Training*, vol. 14, n.º 1, págs. 45-56, 2022, Highlights institutional barriers to 3D tech in low-resource schools.
- [22] L. Smith y H. Brown, «Cost-Effective Prototyping in Educational Settings Using Recycled Materials,» *International Journal of Educational Technology*, vol. 11, n.º 2, págs. 77-85, 2021, Discusses use of aluminum cans for low-cost mechanical components.
- [23] A. Haleem et al., «Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview,» *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, vol. 3, págs. 161-171, 2022. DOI: 10.1016/j.ijcce.2022.08.003.
- [24] J. Balado Frías, «A systematic literature review of low-cost 3D mapping solutions,» ???, 2025, Preprint or early access; retrieved from ScienceDirect (S1566253524004342).
- [25] F. Tabor, *The 3D Creation Playbook: How AI, Scanning Photogrammetry Collide*, <https://www.francescatabor.com/articles/2025/9/9/the-3d-creation-playbook-how-ai-scanning-amp-photogrammetry-collide>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [26] Proyectos CAD, *Escaneado 3D de objetos - Servicios de digitalización 3D*, <https://proyectoscad.com/servicios/escaneado-3d/>, Consultado el 25 de octubre de 2025, 2025.
- [27] M. J. Westoby et al., «‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications,» *Geomorphology*, vol. 179, págs. 300-314, 2012, Accessed: 2026-01-12 via ScienceDirect. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- [28] Amazon.com, Inc., *Dirección multiángulo eléctrico de 2 grados de libertad para bricolaje*, Página de producto en Amazon, Producto de referencia para plataformas pan-tilt de 2 grados de libertad. Incluye diagrama esquemático de circuito similar al utilizado en el prototipo (Power, Stepper drivers A4988, Raspberry Pi, Ringlight control, External camera). Accedido para comparación de diseño y componentes electrónicos., feb. de 2026. visitado 7 de feb. de 2026. dirección: <https://www.amazon.com/-/es/direcci%C3%B3n-multi%C3%A1ngulo-el%C3%A9ctrico-libertad-bricolaje/dp/B0BVMPP4KM?th=1>.
- [29] P. Research, *Photogrammetry - 3D scanning with just your phone/camera*, https://blog.prusa3d.com/photogrammetry-3d-scanning-just-phone-camera_7811/, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [30] SCANOLOGY, *Structured Light Scanners vs. 3D Laser Scanners: Which is Better?* <https://www.3d-scantech.com/structured-light-scanners-vs-3d-laser-scanners-which-is-better/>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [31] A. Consulting, *3D Scanning Techniques: Structured Light, Laser & Photogrammetry*, <https://avestaconsulting.net/blogs/3d-scanning-techniques-structured-light-laser-photogrammetry/>, Accessed: 2026-01-12, 2025.

- [32] O. Documentation, *Basics - How to create a perfect 3D scan*, <https://openscan-org.github.io/OpenScan-Doc/photogrammetry/basics/>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [33] ONVIF, *PTZ Coordinate Spaces*, https://www.onvif.org/wp-content/uploads/2016/12/ONVIF_PTZ_coordinate_spaces-1.pdf, Accessed: 2026-01-12, 2016.
- [34] T. D. Science, «The Math You Need to Pan and Tilt 360° Images,» 2025, Accessed: 2026-01-12.
- [35] Hackster.io, *3D Print Your Own Motorized Pan and Tilt Mount for Your DSLR Camera*, <https://www.hackster.io/news/3d-print-your-own-motorized-pan-and-tilt-mount-for-your-dslr-camera-dc557ed2c7ef>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [36] F. Lin, «Mechatronic Design of Unmanned Aircraft Systems,» en dic. de 2015, ISBN: 9780429188619. DOI: 10.1201/b19009-14.
- [37] H. T. Mechatronics, *DIY Camera Slider with Pan and Tilt Head - Arduino Based Project*, <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/diy-motorized-camera-slider-pan-tilt-head-project/>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [38] R. S. Khurmi y J. K. Gupta, «Theory of Machines,» *Eurasia Publishing House*, 2005, Chapter on Material Selection for Mechanical Systems; Accessed: 2026-01-12.
- [39] M. Magazine, *Choosing Materials for DIY Projects: Cost vs. Performance*, <https://makezine.com/article/makerspace/choosing-materials-for-diy-projects/>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [40] T. A. Association, *Recycling Aluminum: Benefits and Processes*, <https://www.aluminum.org/recycling>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [41] Alu-Stock, *El aluminio — información técnica*, <https://www.alu-stock.es/es/informacion-tecnica/el-aluminio>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [42] U. Global, *Precios de aluminio hoy*, <https://upcycle.global/precios-hoy>, Consulta realizada en 2025; Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [43] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle e I. Harley, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter, 2014, ISBN: 978-3110302783.
- [44] J. De Marco, E. Maset, S. Cucchiario, A. Beinat y F. Cazorzi, «Assessing Repeatability and Reproducibility of Structure-from-Motion Photogrammetry for 3D Terrain Mapping of Riverbeds,» *Remote Sensing*, vol. 13, n.º 13, pág. 2572, 2021. DOI: 10.3390/rs13132572. dirección: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/13/2572>.
- [45] Universitat Politècnica de Catalunya. «Magnitudes luminosas.» Consultado el 12 de febrero de 2026. dirección: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/fundamentosIluminacion-magnitudesLuminosas.php>.
- [46] All3DP. «Software para escaneo 3D y fotogrametría.» dirección: <https://all3dp.com/es/software/software-para-escaneo-3d-y-fotogrametria/>.
- [47] Wikipedia. «Sensor fotoeléctrico.» Consultado el 12 de febrero de 2026. dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_fotoel%C3%A9ctrico.
- [48] Raspberry Pi Foundation, *Raspberry Pi 4 Model B Specifications*, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications>, Consulta realizada en 2025, 2023.
- [49] R. P. Foundation, *Raspberry Pi 4 Datasheet*, <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>, Accessed: 2026-01-12, 2024.
- [50] Megatrónica, *Raspberry Pi 4 Model B 8GB RAM*, Página de producto en tienda en línea, Referencia del componente Raspberry Pi 4B con 8 GB de RAM utilizado en el prototipo para control del sistema (integrado con Pi-Shield, cámara Arducam y motores). Accedido para especificaciones técnicas y costos., feb. de 2026. visitado 7 de feb. de 2026. dirección: <https://megatronica.cc/producto/raspberry-pi4-8gb/>.

- [51] ArduCAM, *IMX519 Autofocus camera module for Raspberry Pi (ArduCAM-B0371)*, <https://www.arducam.com/imx519-autofocus-camera-module-for-raspberry-pi-arducam-b0371.html>, Consulta realizada en 2025, 2025.
- [52] A. Wiki, *16MP IMX519 - Native Camera*, <https://docs.arducam.com/Raspberry-Pi-Camera/Native-camera/16MP-IMX519/>, Accessed: 2026-01-12, 2025.
- [53] SaleWireOV, *Dirección multiángulo eléctrico de 2 grados de libertad para bricolaje*, Página de producto en tienda en línea, Producto de referencia para plataformas pan-tilt de 2 grados de libertad. Incluye descripción de componentes mecánicos y eléctricos similares al prototipo desarrollado en la tesis (motores, estructura de rotación y control de ángulos). Accedido para comparación de diseño y costos., feb. de 2026. visitado 7 de feb. de 2026. dirección: https://salewireov.click/product_details/1955959.html.
- [54] StepperOnline, *NEMA 17 Stepper Motor*, <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor>, Consulta realizada en 2025, 2025.
- [55] Ariat-Tech, *Guía completa de motores paso a paso NEMA 17: Cómo funcionan, ventajas y desventajas, cómo usarlos y sus aplicaciones*, Entrada de blog en línea, Guía técnica sobre motores NEMA 17, utilizada como referencia para la selección y aplicación de motores paso a paso (13 Ncm y 40 Ncm) en el prototipo de plataforma pan-tilt. Accedido para información sobre funcionamiento, ventajas, desventajas y conexión con controladores A4988., feb. de 2026. visitado 7 de feb. de 2026. dirección: <https://www.ariat-tech.es/blog/guide-to-nema-17-stepper-motors-how-they-work,advantages-and-disadvantages,how-to-use-them,and-their.html>.
- [56] Pololu Corporation, *A4988 Stepper Motor Driver Carrier — specs*, <https://www.pololu.com/product/1182/specs?utm>, Consulta realizada en 2025, 2025.
- [57] Ubuy Ecuador, *Shillehtek Original A4988 Stepper Motor Driver with Heatsink, 1.5A, for 3D Printer, Reprap, Suitable for Mendel, Huxley, Arduino*, Página de producto en tienda en línea, Referencia del controlador de motor paso a paso A4988 con disipador de calor (1.5A), utilizado en el prototipo para controlar los motores NEMA 17. Accedido para especificaciones técnicas, compatibilidad con Arduino/Raspberry Pi y costos en el mercado ecuatoriano., feb. de 2026. visitado 7 de feb. de 2026. dirección: <https://www.ubuy.ec/es/product/IVX9NABHS-shillehtek-original-a4988-stepper-motor-driver-with-heatsink-1-5a-for-3d-printer-reprap-suitable-for-mendel-huxley-arduino>.
- [58] Amazon Listing, *12 V / 2.5 A Power Supply (MTDZKJG-100V-240V Transformer) — product page*, <https://www.amazon.com/MTDZKJG-100V-240V-Transformer-humidifier-Equipment/dp/B0CCRSXJJ5?>, Consulta realizada en 2025, 2025.
- [59] *Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes*, Defines mechanical properties and strength classes such as 8.8, 10.9 and 12.9 for bolts and screws, International Organization for Standardization, 2013.
- [60] H. Ukida et al., «Illumination effects on 3D shape reconstruction using photometric stereo,» *International Journal of Computer Vision*, vol. 83, n.º 2, págs. 145-160, 2009, Referencia sobre el impacto de la iluminación en procesos de fotogrametría y reconstrucción 3D. DOI: 10.1007/s11263-009-0225-0.
- [61] Y. Chen et al., «Lighting and calibration effects on 3D scanning accuracy in low-resource environments,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 67, págs. 112-125, 2023, Artículo que analiza el efecto de la iluminación y calibración en la precisión de escaneo 3D. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.01.005.

- [62] ROHM Semiconductor, «BH1750FVI Digital Ambient Light Sensor IC Datasheet,» ROHM Semiconductor, inf. téc., 2011, Datasheet oficial del sensor BH1750 utilizado para medición de iluminancia en lux. dirección: <https://www.rohm.com/products/databook/datasheet/discrete/opto-semiconductors/light-sensor/bh1750fvi>.
- [63] NCN Poker. «Producto en línea.» Consultado el 12 de febrero de 2026. dirección: <https://www.ncnpoker.com/producto-p-182788.html>.
- [64] NXP Semiconductors, «PCF8574 Remote 8-bit I/O expander for I2C-bus Datasheet,» NXP Semiconductors, inf. téc., 2013, Datasheet del adaptador I2C utilizado en el módulo LCD 16x2. dirección: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF8574_PCF8574A.pdf.
- [65] Frank de Brabander, *LiquidCrystalI2C Library for Arduino*, Librería estándar para control de displays LCD con interfaz I2C, 2023. dirección: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C.
- [66] Tecmikro. «LCD 16x2 con I2C.» dirección: <https://tecmikro.com/led-lcd/351-lcd-16x2-i2c.html>.
- [67] Arduino, *Arduino Uno Rev3 Documentation*, Documentación oficial del microcontrolador Arduino Uno empleado como controlador del subsistema, 2024. dirección: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>.
- [68] Tecmikro. «Arduino Uno R3 características.» dirección: <https://tecmikro.com/content/17-arduino-uno-r3-caracteristicas>.
- [69] u/3DPrintBunny, *3D Scan and Print a Compressor Wheel (49mm)*, Publicación en Reddit, subreddit r/3Dprinting, ago. de 2020. visitado 7 de feb. de 2026. dirección: https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/i3mryh/3d_scan_and_print_a_compressor_wheel_49mm/.
- [70] Formlabs, *How to Use 3D Scanning and 3D Printing for Reverse Engineering*, <https://formlabs.com/blog/how-to-use-3d-scanning-and-3d-printing-for-reverse-engineering/>, Accessed: 2026-02-08, s. f.
- [71] gorylek85bt. «Dog in a hat and scarf 3D scan.» Publicado en Cults3D, actualizado el 30 de junio de 2024. Accedido: 12-02-2026. dirección: <https://cults3d.com/es/modelo-3d/arte/dog-in-a-hat-and-scarf-3d-scan>.
- [72] Formlabs, *Introduction to 3D Scanning*, <https://formlabs.com/asia/blog/introduction-to-3d-scanning/>, Accessed: 2026-02-08, s. f.
- [73] J. L. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 9.^a ed. Cengage Learning, 2016.
- [74] D. C. Montgomery y G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 6.^a ed. John Wiley & Sons, 2012.
- [75] Fórmulas Explicadas. «Coeficiente de correlación de Pearson.» Accedido: 12-02-2026. dirección: <https://www.formulasexplicadas.com/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/>.
- [76] D. A. y. o. Coelho, «Human factors focused mechatronic design at low cost,» *Proceedings of some conference or similar*, 2008, Ejemplo basado en metodologías ergonómicas y de bajo costo en mecatrónica.
- [77] E. y. c. Lugo-González, «Diseño mecatrónico implementado en el desarrollo de prototipos virtuales y físicos,» *ResearchGate o similar publicación*, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.12345.6789.
- [78] V. -. V. D. Ingenieur, *VDI 2206: Design methodology for mechatronic systems*, Norma alemana ampliamente usada en diseño mecatrónico iterativo, 2004.
- [79] S. K. Das, «The life-cycle energy and environmental emissions of aluminum products,» *JOM*, vol. 60, n.º 11, págs. 24-28, 2008.
- [80] M. A. Nero y J. F. Reinoso, *Positional accuracy in close-range photogrammetry through geodetic control*, 2023.
- [81] Fernández Santana, Gianmarco y Game Valencia, Allison Delia, *Desarrollo del sistema de escaneo 3D de bajo costo*, Elaboración propia, 2026.

ANEXO A PLANOS

Láminas acotadas de las piezas diseñadas en SolidWorks:

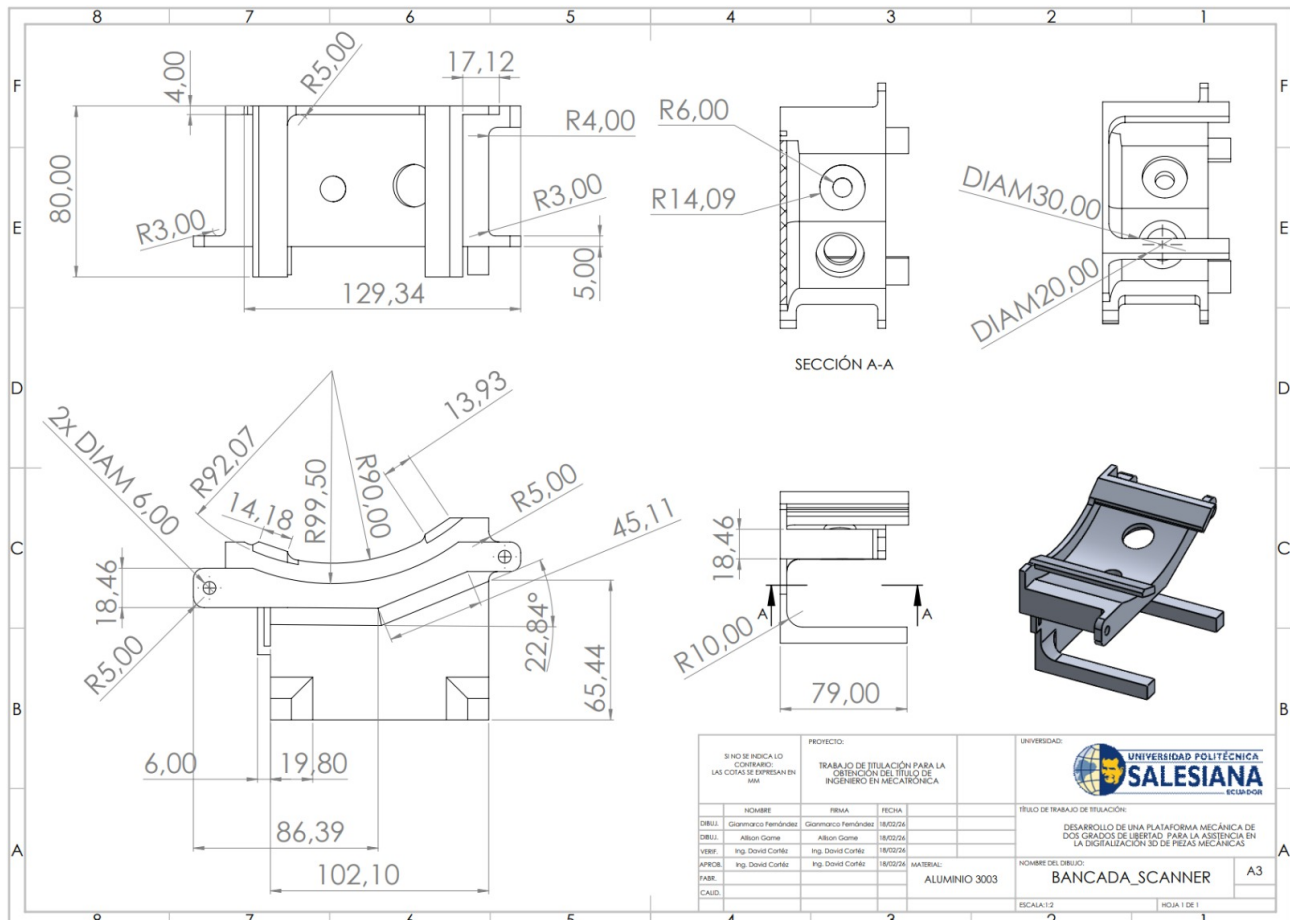


Figura 94. Lámina acotada de la Bancada del Scanner [81].

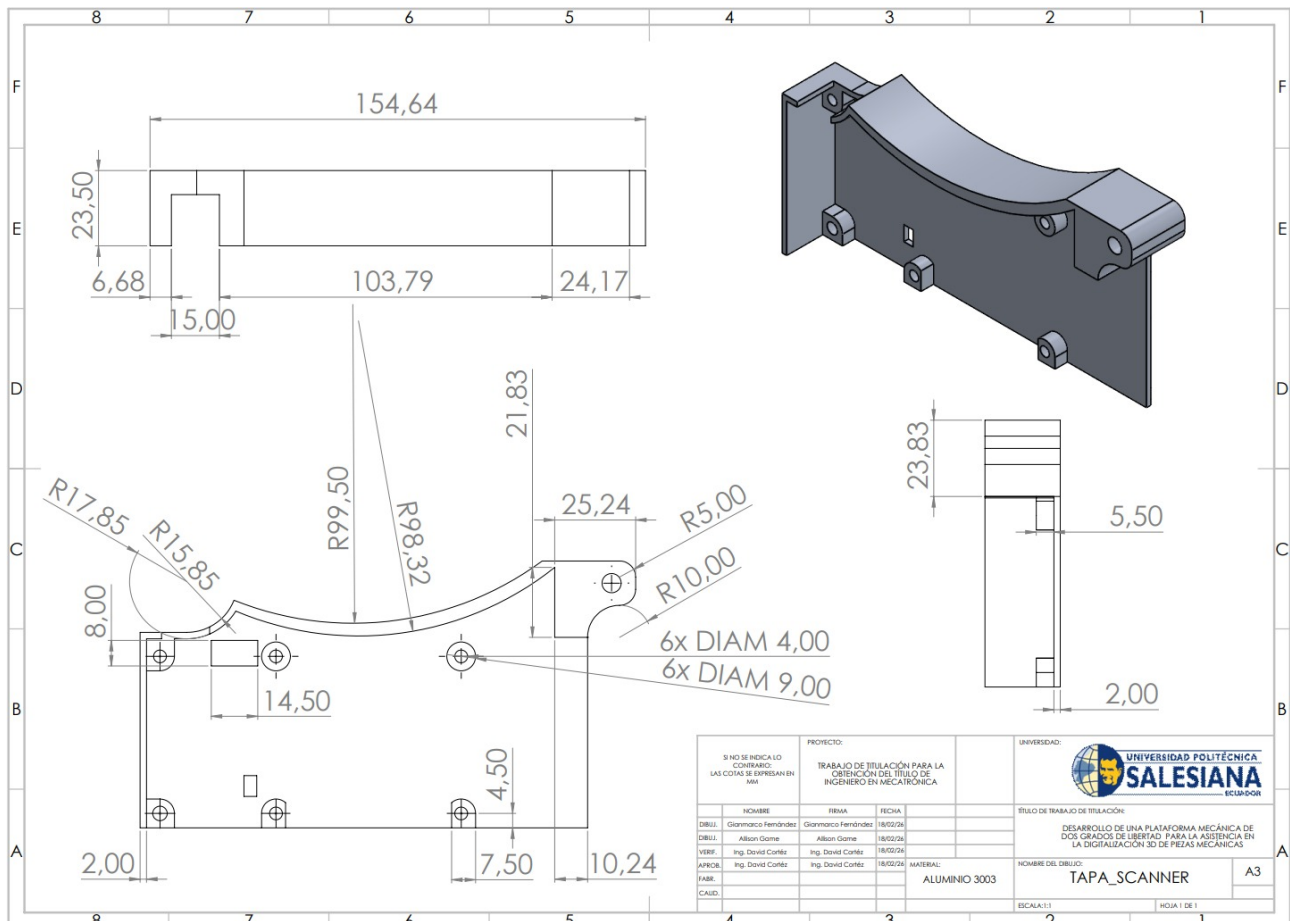


Figura 95. Lámina acotada de tapa frontal del Scanner [81].

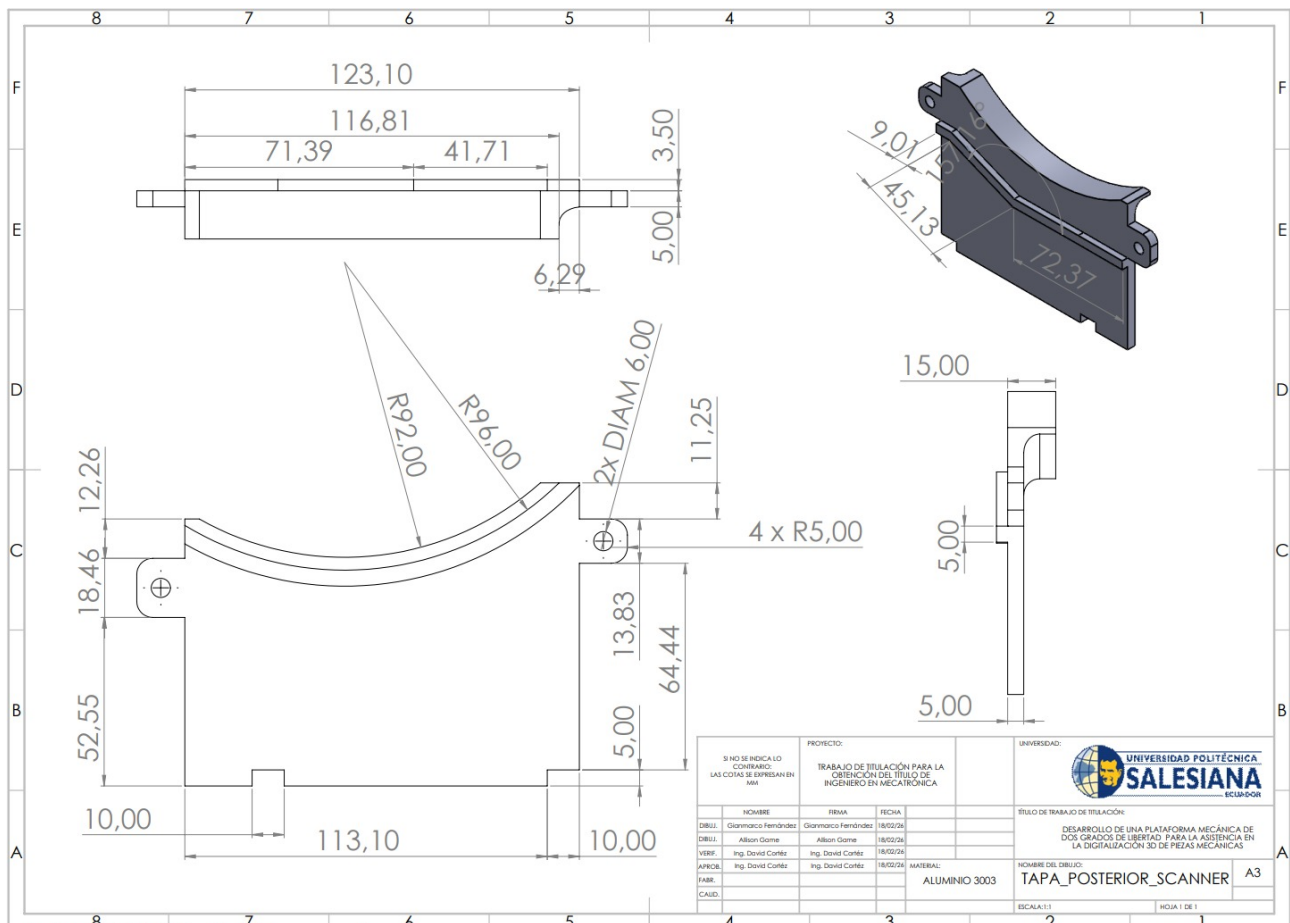


Figura 96. Lámina acotada de la tapa posterior del Scanner [81].

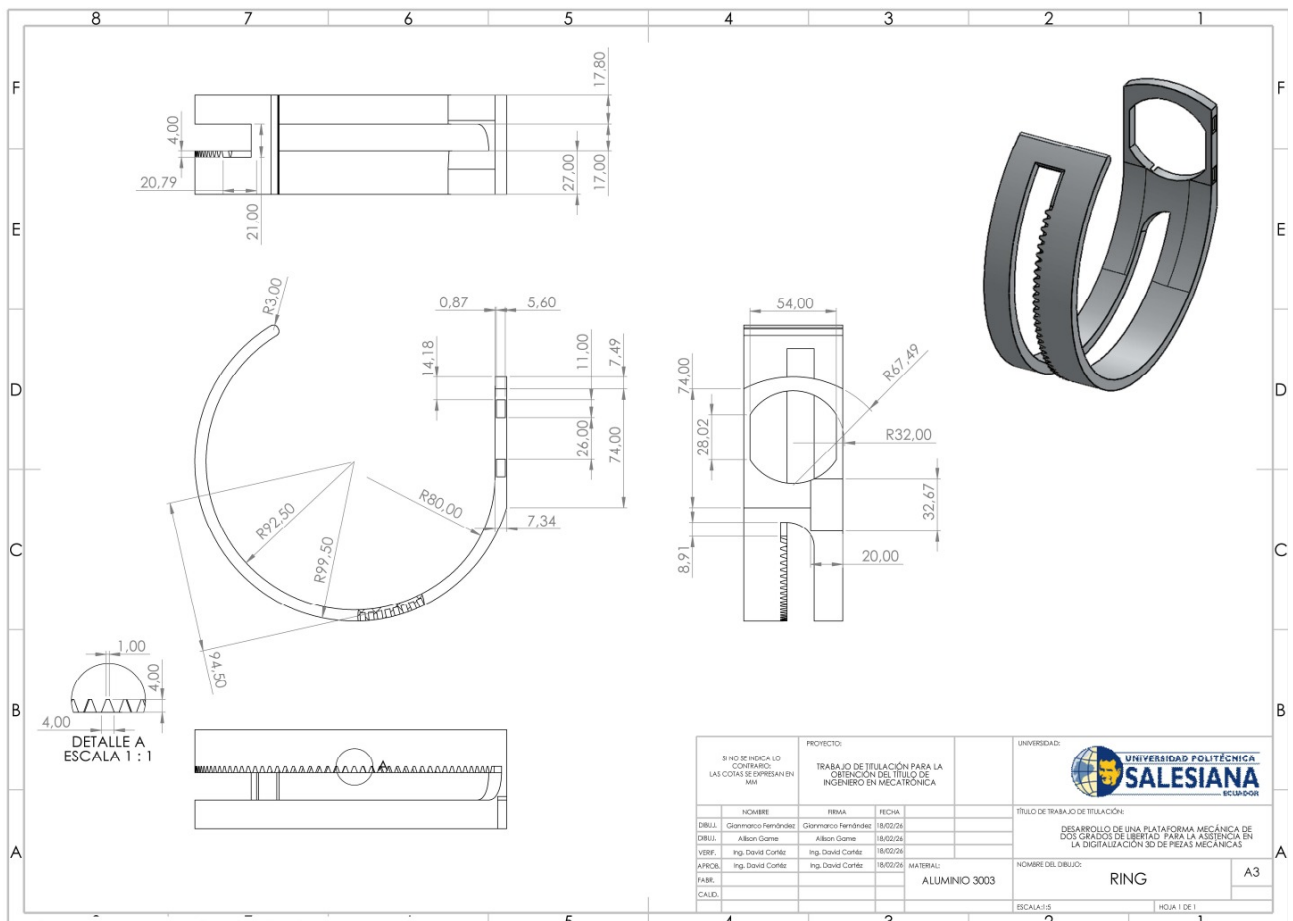


Figura 97. Lámina acotada del anillo/ media luna del Scanner [81].

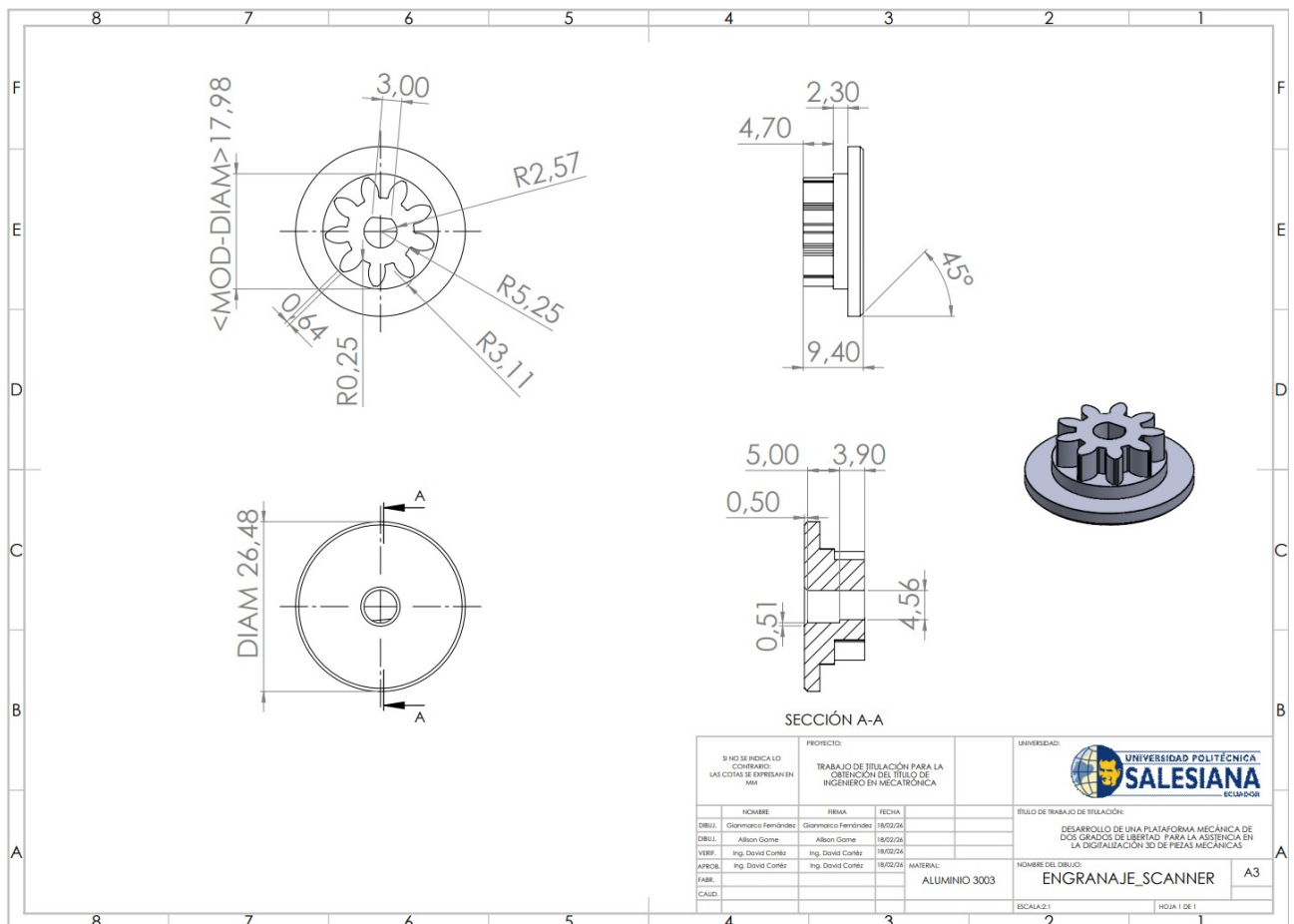


Figura 98. Lámina acotada del engranaje del Scanner [81].

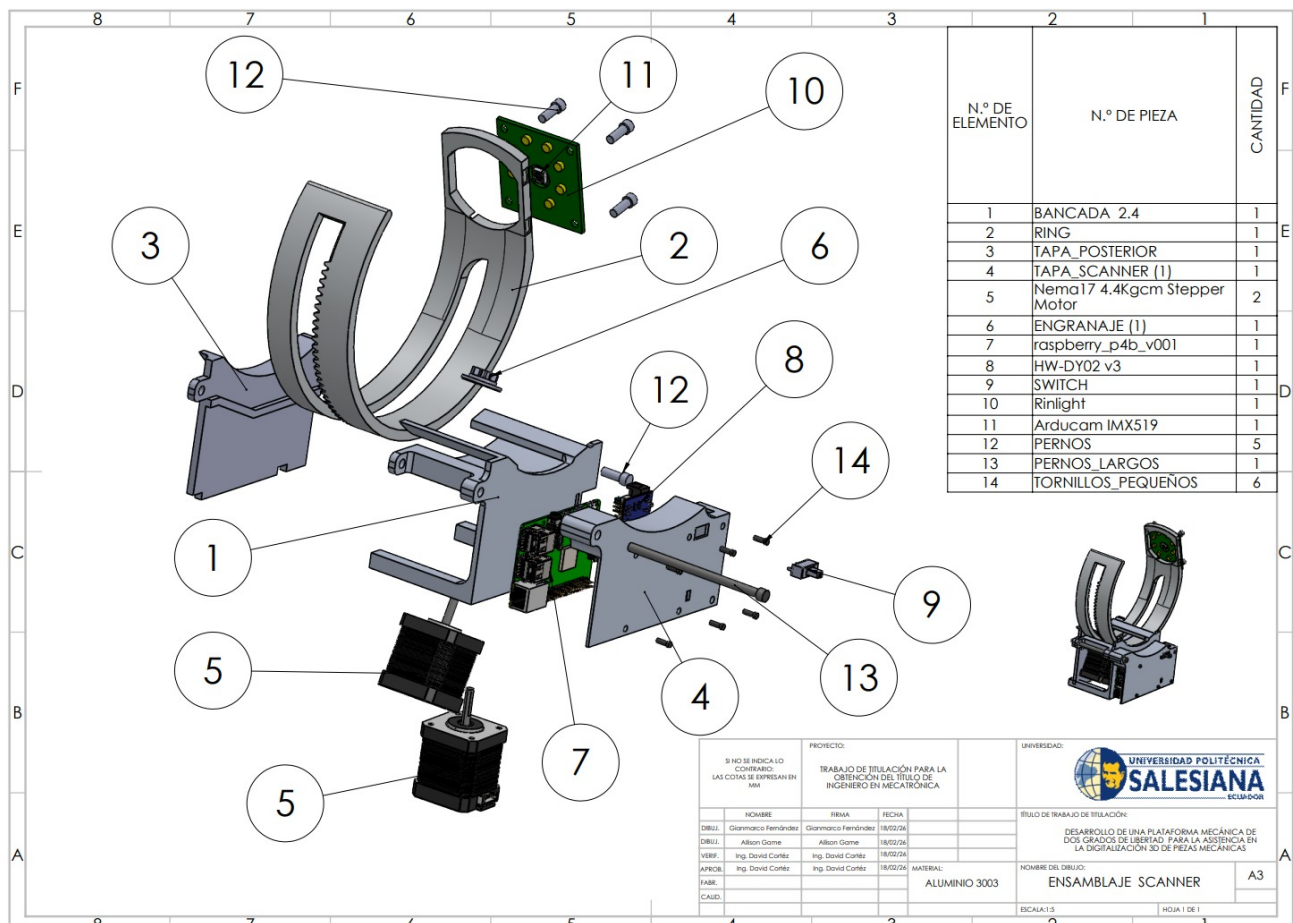


Figura 99. Lámina de la vista explosionada del Scanner [81].

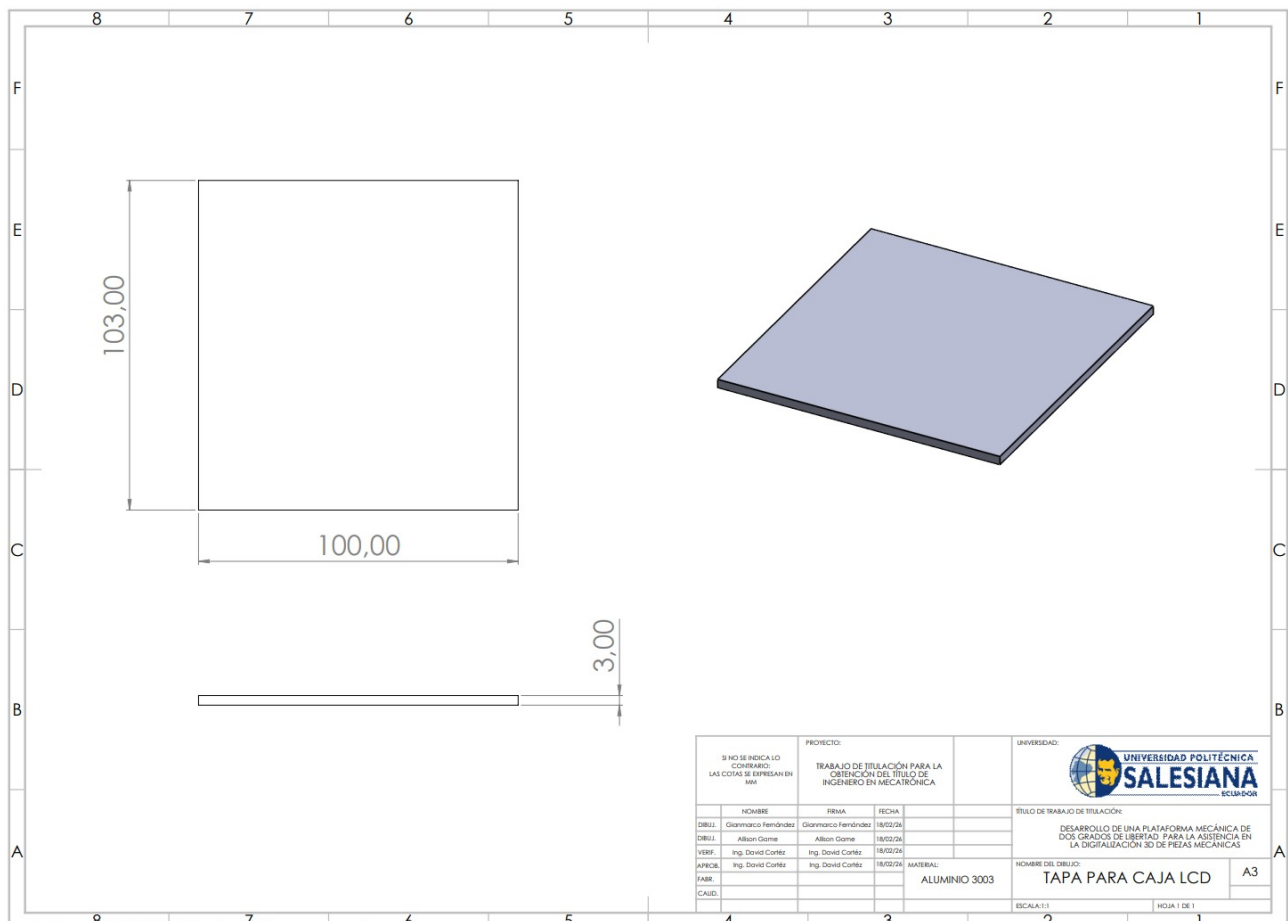


Figura 100. Lámina acotada de la tapa de la caja del LCD [81].

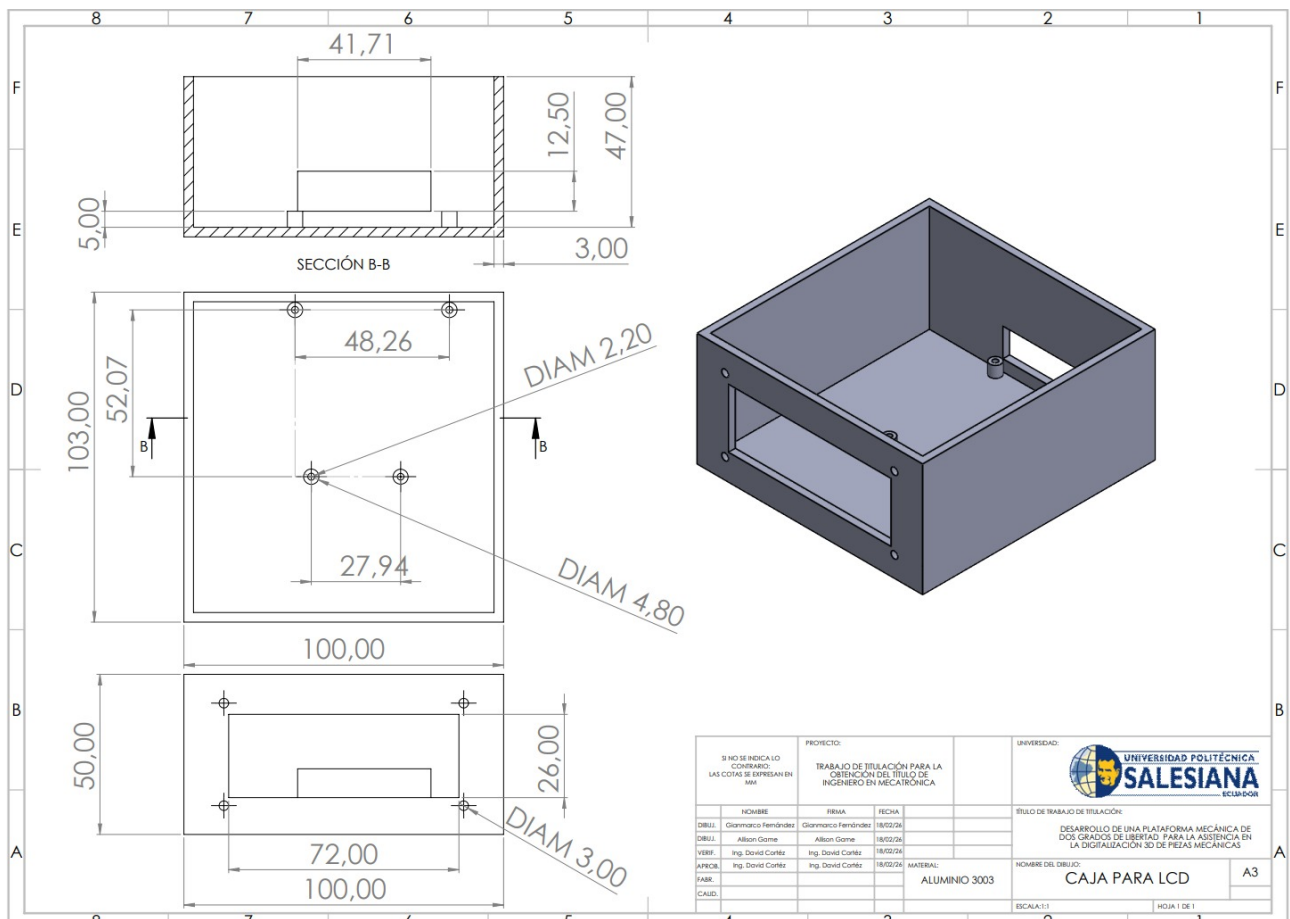


Figura 101. Lámina acotada de la caja del LCD [81].

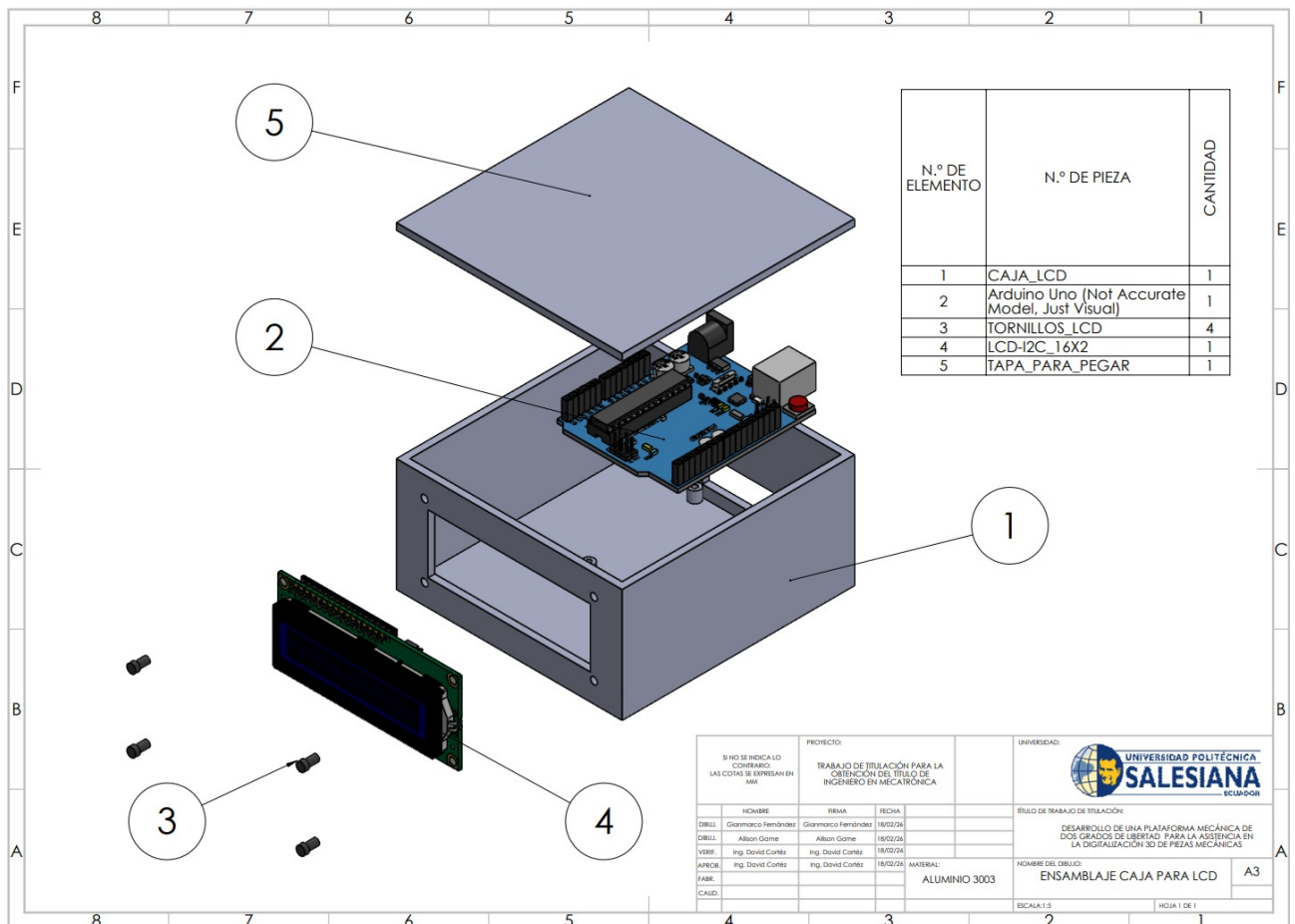


Figura 102. Lámina de la vista explosionada de la caja del LCD [81].

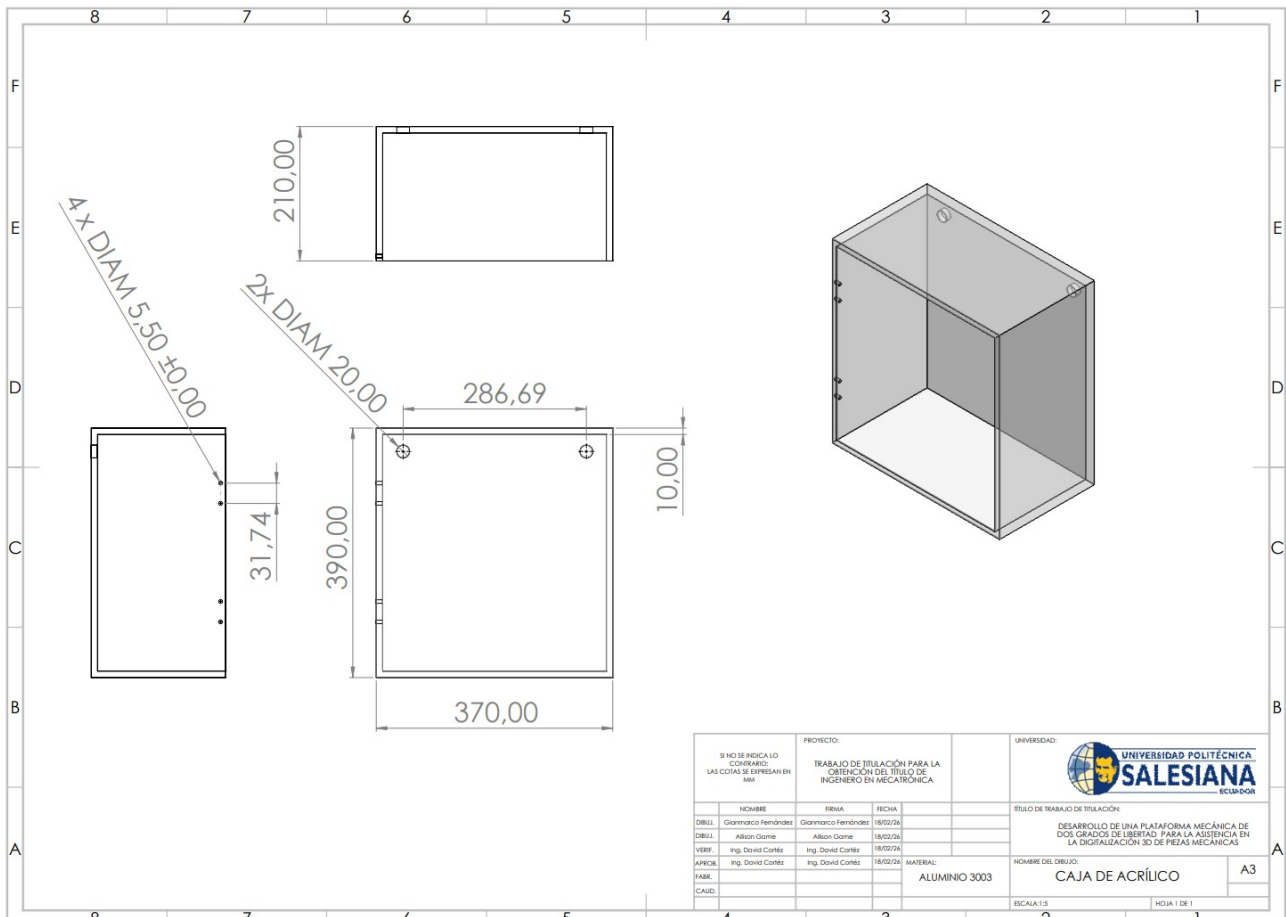


Figura 103. Lámina acotada de la caja de acrílico [81].

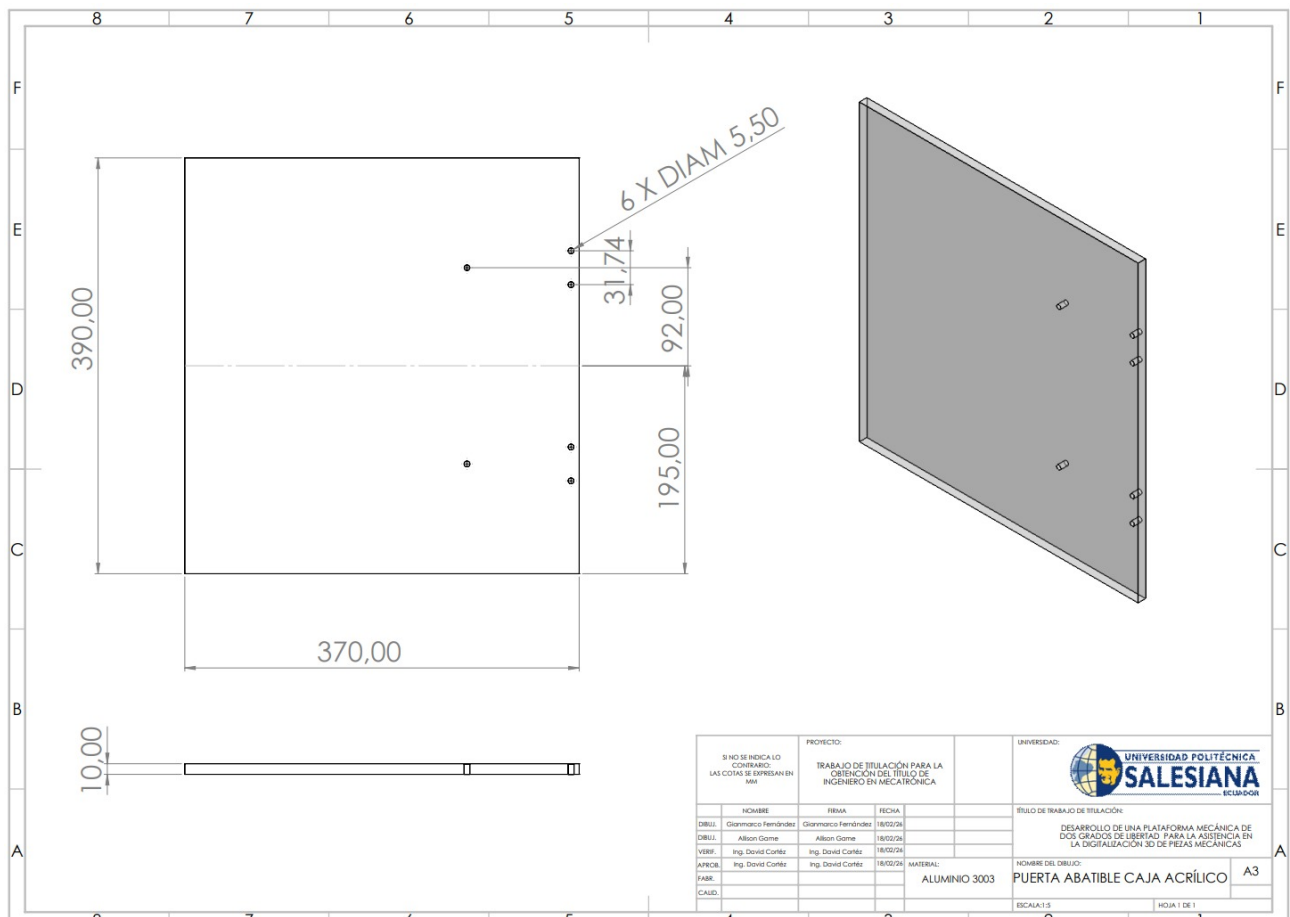


Figura 104. Lámina acotada de puerta abatible de la caja de acrílico [81].

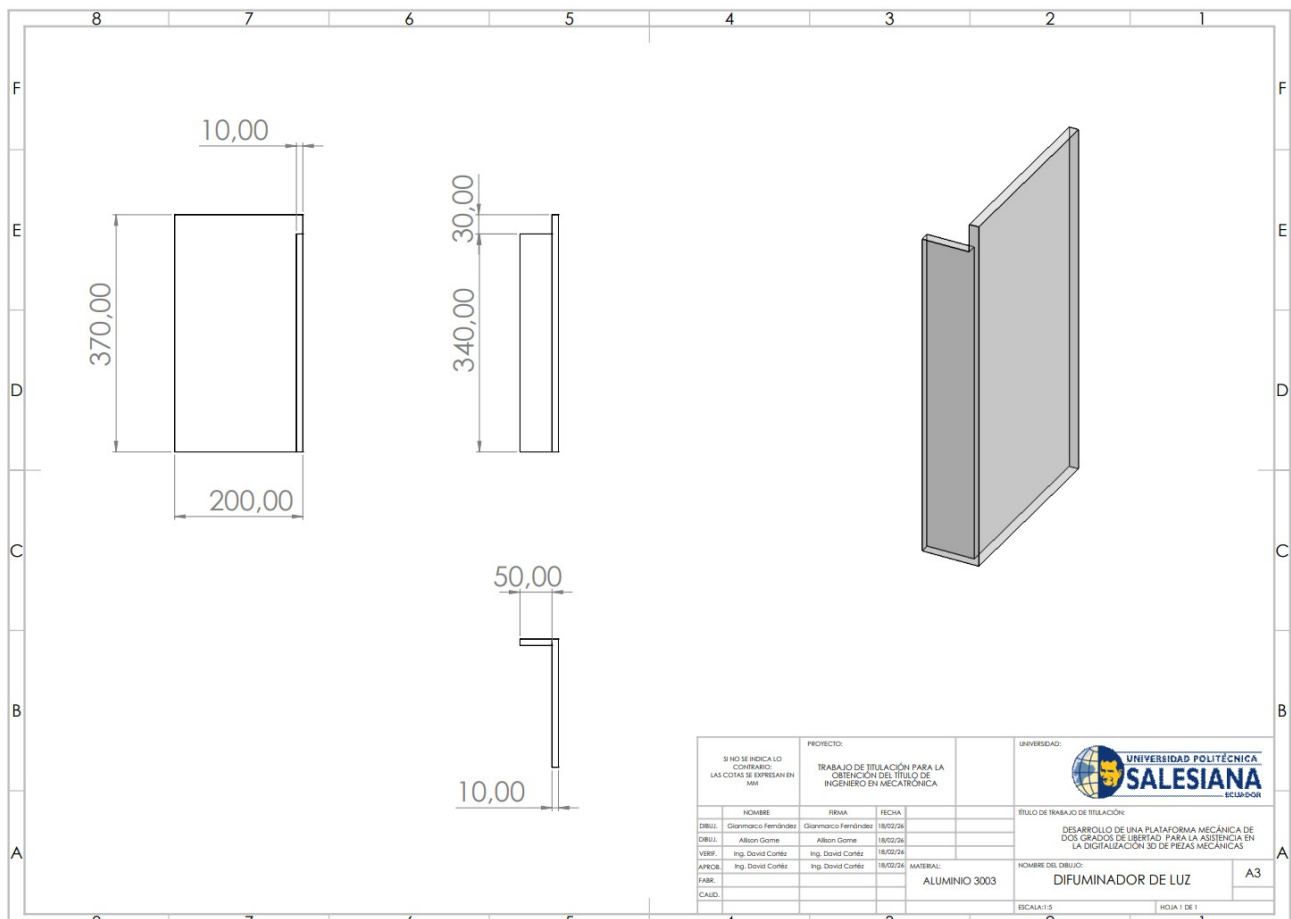


Figura 105. Lámina acotada dl difuminador de luz de la caja de acrílico [81].

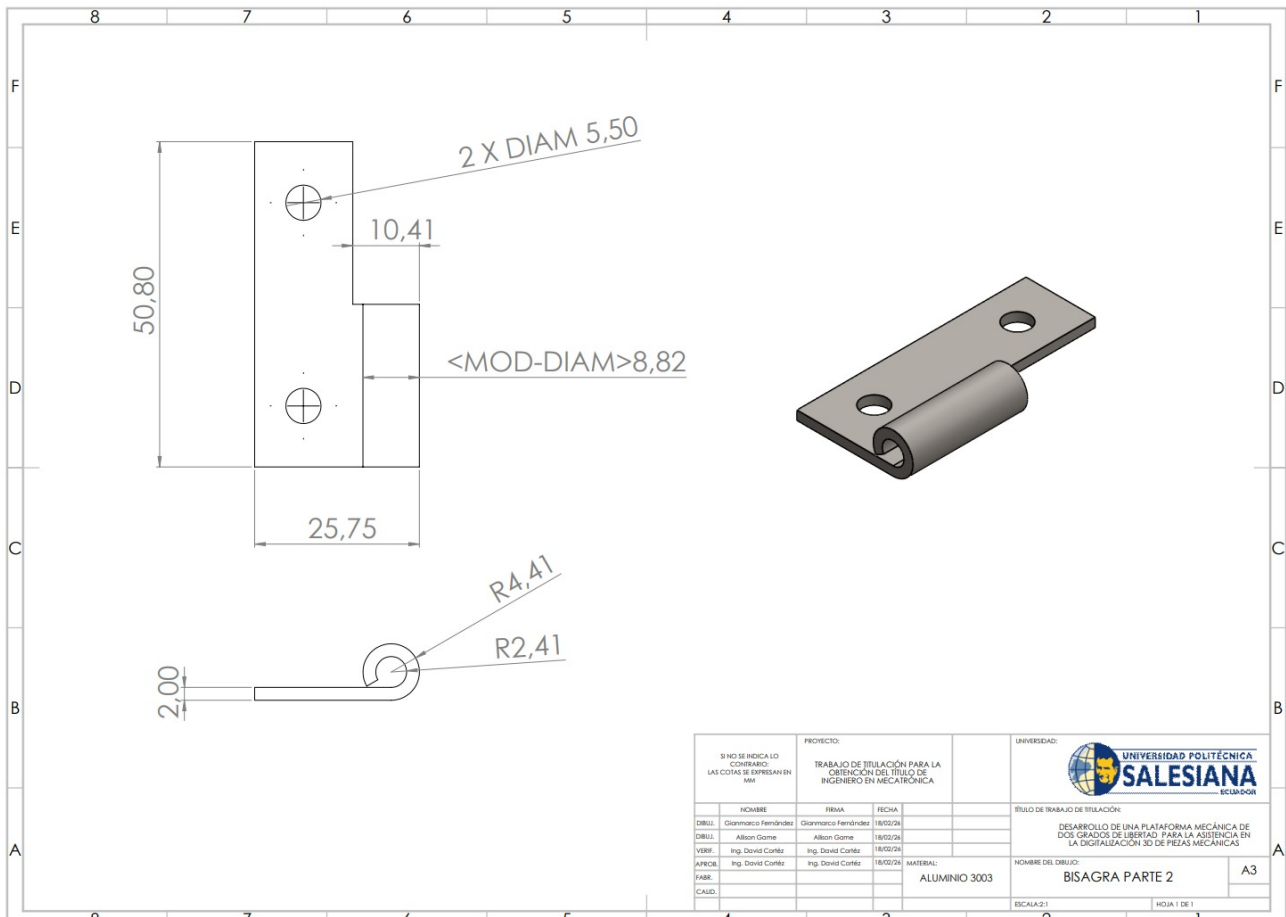


Figura 106. Lámina acotada de parte 1 de la bisagra para la puerta abatible de la caja de acrílico [81].

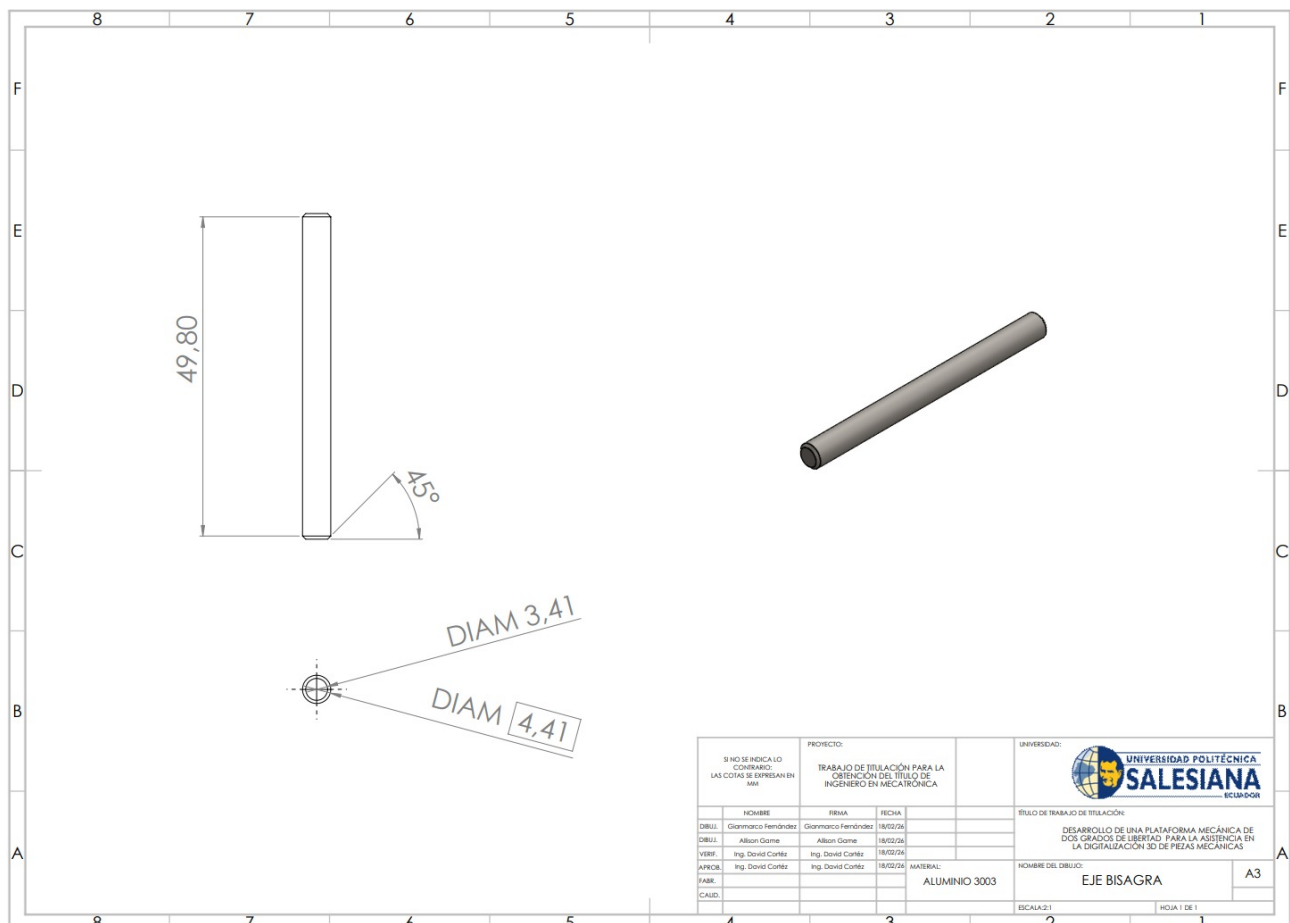


Figura 107. Lámina acotada del eje de la bisagra para la puerta abatible de la caja de acrílico [81].

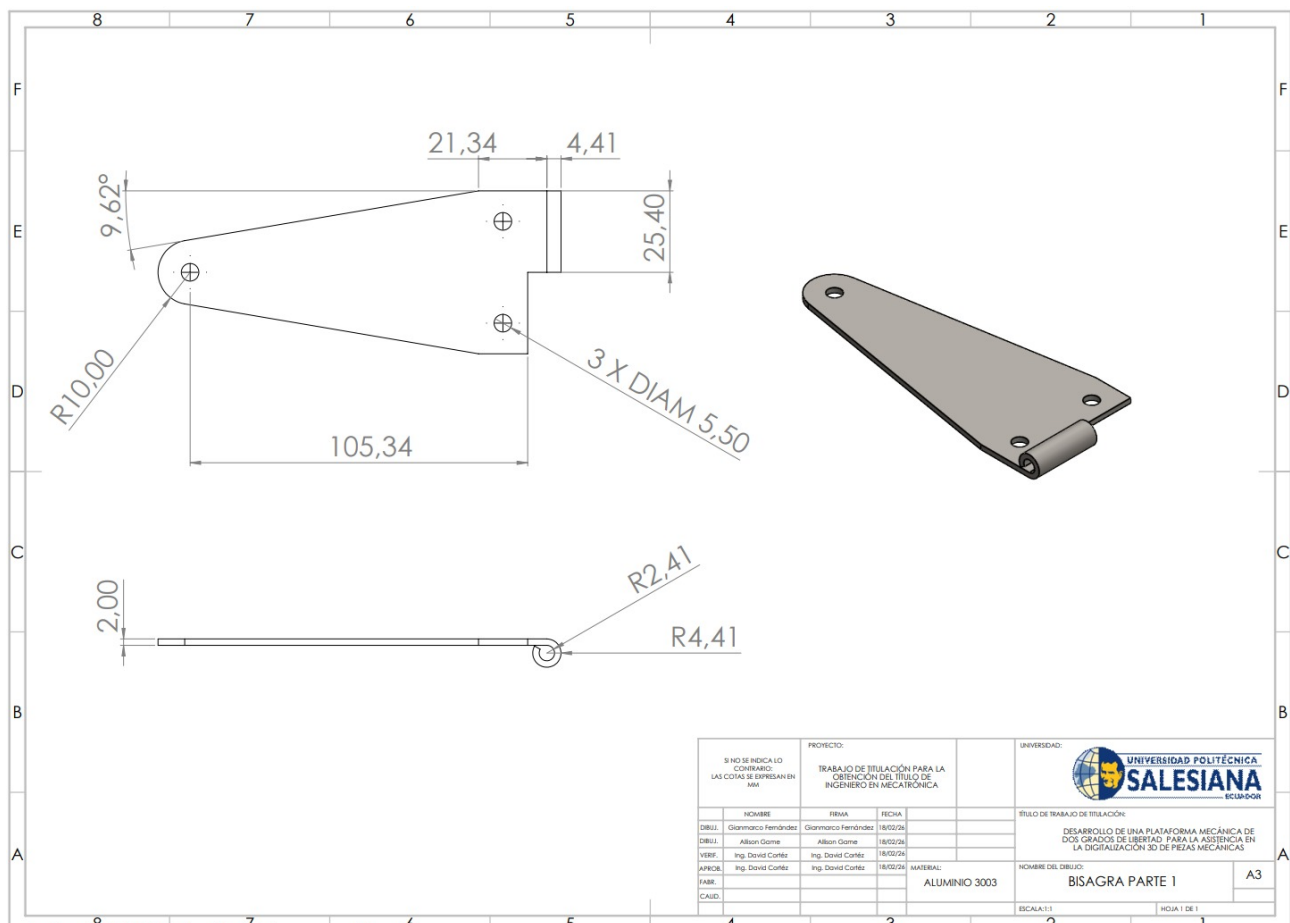


Figura 108. Lámina acotada de parte 2 de la bisagra para la puerta abatible de la caja de acrílico [81].

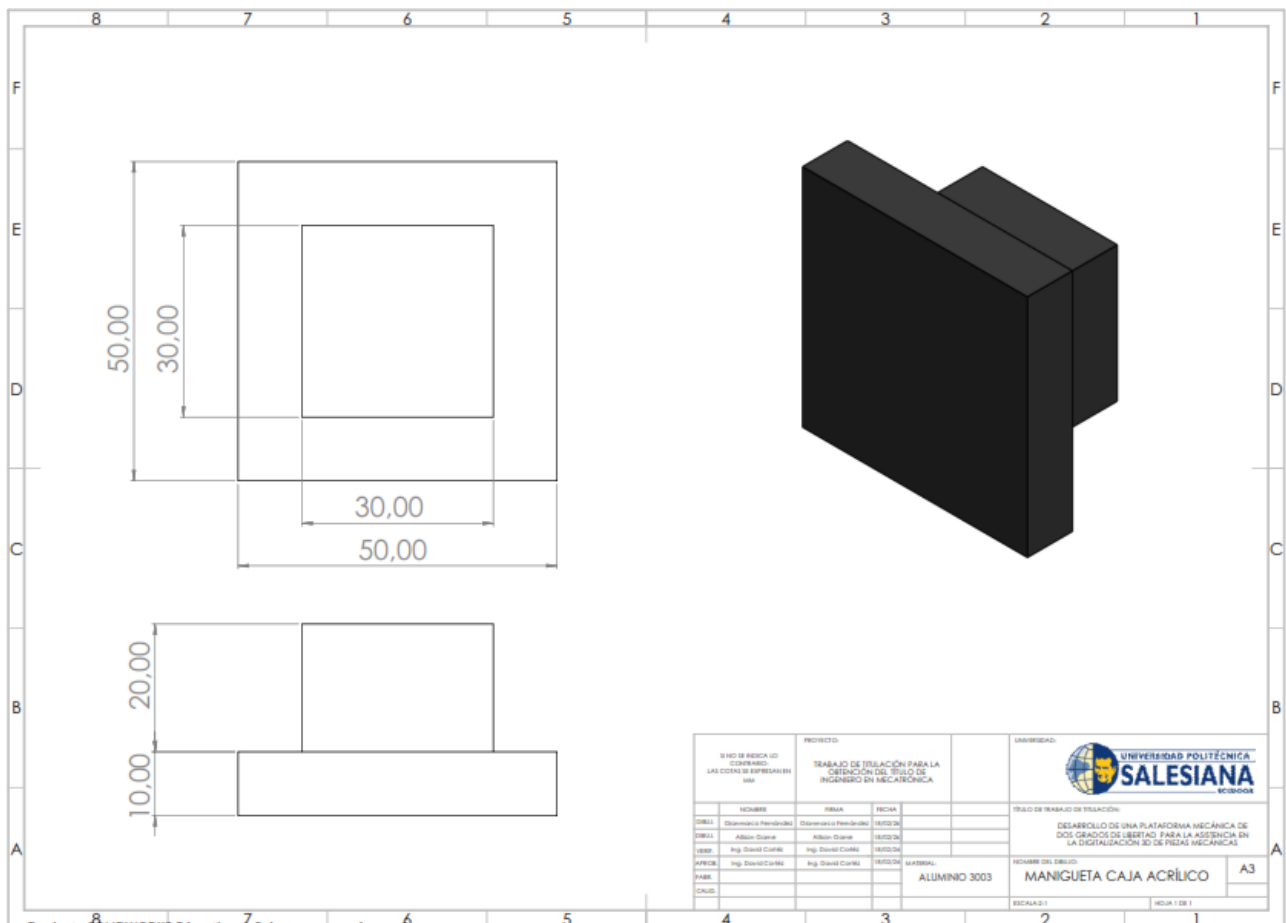


Figura 109. Lámina acotada de la manigueta de la caja de acrílico [81].

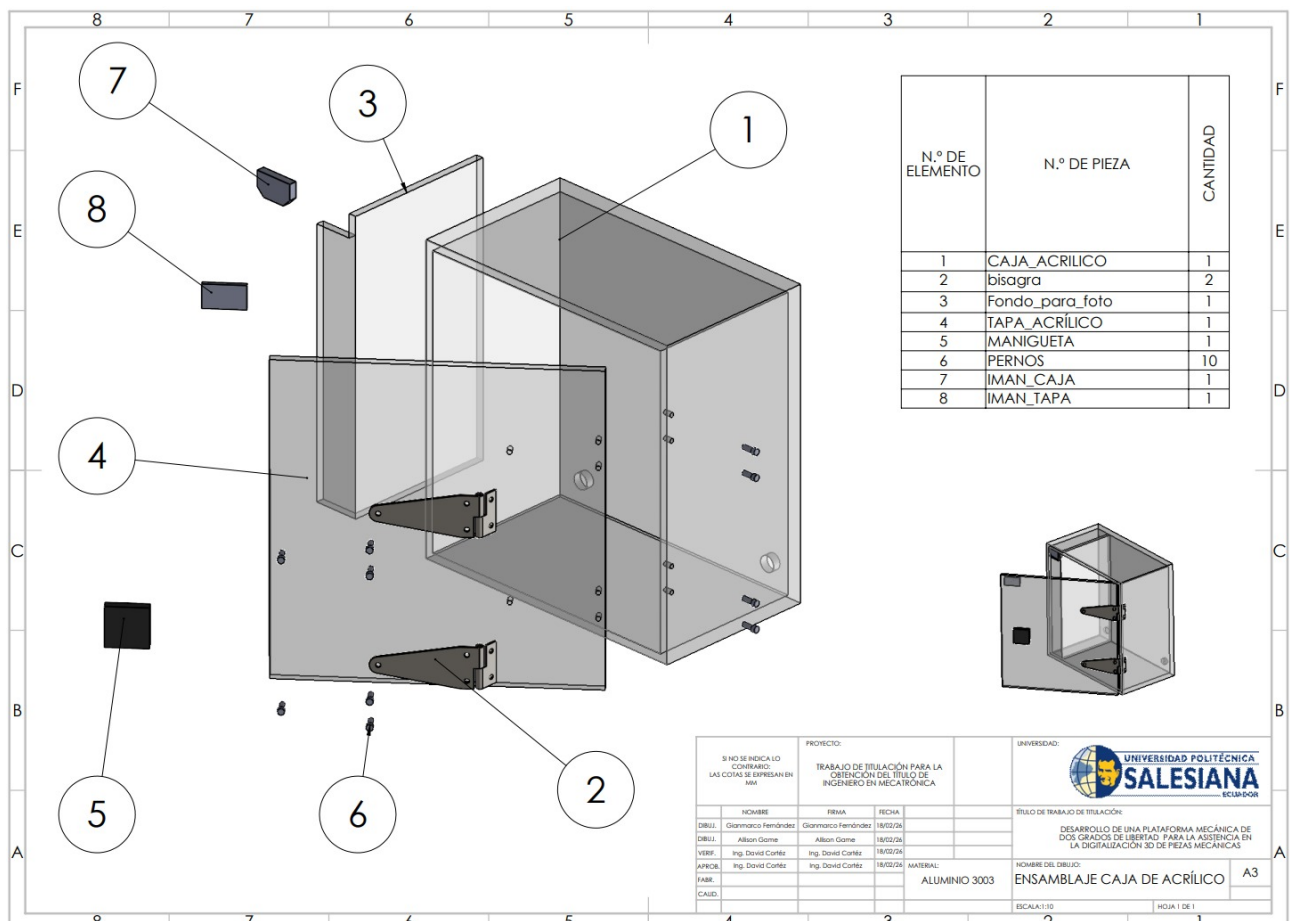


Figura 110. Lámina de la vista explosionada de la caja de acrílico [81].

ANEXO B

OPENSCAN FIRMWARE

Se puede acceder mediante <http://openscan/> o también por medio de <http://openscan.local/>

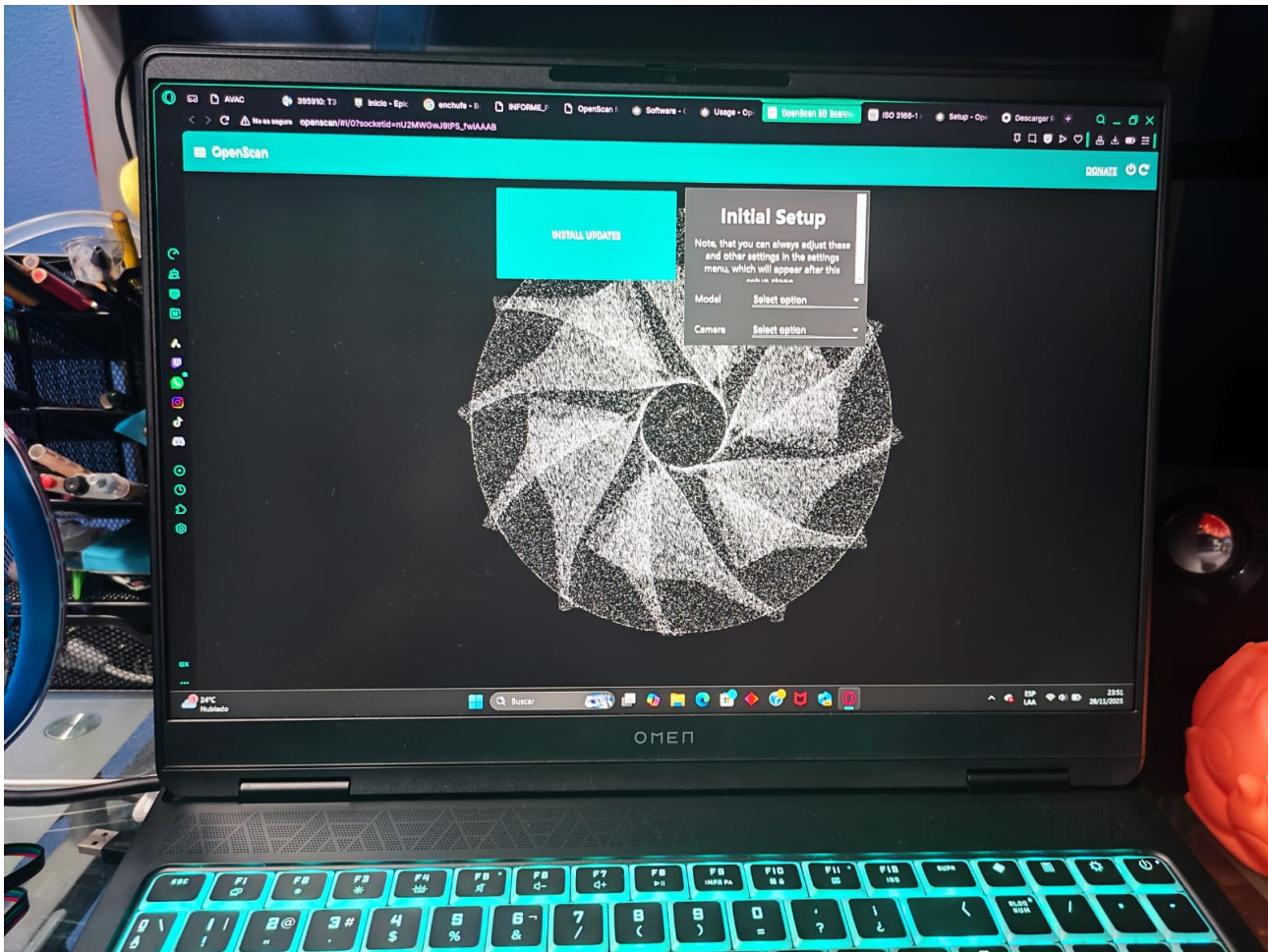


Figura 111. Interfaz web de OpenScan.[81]