

Escuela Superior Politécnica Del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Sistema de Empaquetado con control de calidad inteligente utilizando
dispositivos mecatrónicos embebidos para PYMEs Agrícolas.

Proyecto Integrador

Previo a la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecatrónica

Presentado por:

Angelo Alexander Espinoza Pinela

Cristhian Omar Flores Flores

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios por brindarme fortaleza y guía a lo largo de mi formación. A mis padres, Rocío del Pilar Pinela Espinoza y Raúl Gonzalo Moyón Alvarado, por su apoyo incondicional y ejemplo; a mis hermanos Dayana y Aimar Moyón, por ser mi motivación diaria; y a mi abuela Carmen Espinoza Paz, por su constante confianza y aliento, así como al recuerdo de quienes me observan desde el cielo. También dedico este logro a mis familiares, amigos del colegio y de la universidad, y a mis compañeros de residencia, especialmente al “tridente de residencias”, por su apoyo, amistad y acompañamiento durante este proceso.

Angelo Espinoza P.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre, por su fortaleza, apoyo y por ser la razón que me impulsa a seguir adelante y creer en mí. A mi hermana, que recién inicia su propio camino y a quien siempre apoyaré como ella lo ha hecho conmigo. A mi padre y a mi hermano, por sus consejos y respaldo durante este proceso. Finalmente, a mis amigos, por su compañía, apoyo y por haber sido parte importante de este camino y de este logro.

Cristhian Flores F.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa académica y por darme la fortaleza para superar cada desafío. A mis padres y a mi abuela, por su apoyo incondicional, confianza y por ser un pilar fundamental en mi formación personal y profesional. A mis hermanos, por su cariño y motivación constante. A mis amigos del colegio (kenny, Jhon, Erick), de la universidad (Steven M, Omar F, Bryan B, Jhon R, Steven Z, Kenny G) y compañeros de residencia (Crithian, Raúl), por su apoyo y compañerismo durante este proceso. Asimismo, agradezco a los docentes que formaron parte de mi formación académica por sus enseñanzas y orientación. Finalmente, me agradezco a mí mismo por la constancia, disciplina y determinación que me permitieron llegar hasta este logro.

Angelo Espinoza P.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres y hermanos por su apoyo constante, esfuerzo y por estar siempre presentes incluso en los momentos difíciles. A mis padrinos y a mi familia, por su respaldo incondicional y por demostrarme que la unión familiar es una gran fortaleza. A mis amigos, especialmente Cristhian Balcázar, Néstor Díaz, Ángel Espinoza y Steven Martínez, por el apoyo y los momentos compartidos durante este proceso. Asimismo, agradezco a mi tutor, el Ing. Ronald Solís, por su guía, conocimientos y orientación durante el desarrollo de este proyecto, y a mis amigos cercanos por su motivación y compañía en los momentos de mayor presión.

Cristhian Flores F.

Declaración Expresa

Nosotros Angelo Alexander Espinoza Pinela y Cristhian Omar Flores Flores acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de octubre del 2025.



Angelo Alexander
Espinoza Pinela



Cristhian Omar Flores
Flores

Evaluadores

Jonathan Roberto León Torres, MSc.

Profesor de la materia

Ronald David Solís Mesa

Tutor del proyecto

Resumen

Este proyecto presenta el diseño y desarrollo de un sistema automatizado para la inspección, clasificación, empaquetado y sellado de frutas orientado a pequeños productores agrícolas. La propuesta integra una banda transportadora, un sistema de visión artificial basado en el modelo de detección YOLO entrenado para identificar defectos en mangos, y un sistema de clasificación automática mediante actuadores controlados por un microcontrolador ESP32.

El modelo de visión artificial fue implementado en una unidad de procesamiento encargada del análisis de imágenes en tiempo real, mientras que el microcontrolador se encargó de la coordinación de sensores y actuadores dentro del sistema. Asimismo, se desarrolló un módulo de empaquetado y sellado automático que permite obtener un producto final listo para su comercialización.

Las pruebas realizadas permitieron comprobar el correcto funcionamiento del sistema, logrando una detección adecuada de los frutos y una operación estable de los módulos de transporte, clasificación y sellado.

Palabras clave: visión artificial, YOLO, sistema embebido, clasificación automática de frutas, automatización agroindustrial.

Abstract

This project presents the design and development of an automated system for the inspection, classification, packaging, and sealing of fruits aimed at supporting small agricultural producers. The proposed system integrates a conveyor belt, a computer vision system based on the YOLO detection model trained to identify defects in mangoes, and an automatic classification mechanism using actuators controlled by an ESP32 microcontroller.

The vision model was implemented in a processing unit responsible for real-time image analysis, while the microcontroller managed the coordination of sensors and actuators within the system. In addition, an automatic packaging and sealing module was developed to obtain a final product ready for commercialization.

Experimental tests confirmed the correct operation of the system, achieving reliable fruit detection and stable operation of the transport, classification, and sealing modules.

Keywords: computer vision, YOLO, embedded system, automatic fruit classification, agroindustrial automation.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Abreviaturas	X
Índice de figuras	XII
Índice de tablas	XIV
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Marco teórico	6
1.4.1 Automatización en procesos de clasificación y control de calidad de frutas	6
1.4.2 Sistemas embebidos y su aplicación en la agricultura	7
1.4.3 Visión e inteligencia artificial aplicada al control de calidad	8
1.4.4 Aprendizaje profundo para la inspección visual automatizada	8
1.4.5 Plataformas embebidas y controladores para modelos de IA	9
1.4.6 Etapa de lavado de frutas	10
1.4.6.1 Método de lavado por aspersion	10
1.4.6.2 Método de lavado por inmersión	11
1.4.7 Etapa de transporte de frutas	11

1.4.7.1	Elevador de banda con tacos o estrías	12
1.4.7.2	Transportador horizontal de banda continua	13
1.4.8	Métodos de clasificación de frutas	14
1.4.8.1	Clasificación manual	14
1.4.8.2	Clasificación con sensores fotoeléctricos	15
1.4.9	Etapas de sellado y empaquetado	15
1.4.9.1	Sellado por calor	16
1.4.9.2	Sellado por vacío	16
Capítulo 2	17
2. Metodología	18
2.1	Enfoque metodológico general	18
2.2	Etapas incorporadas	18
2.3	Formulación de alternativas de solución	19
2.3.1	Alternativas para el transporte hacia la inspección	19
2.3.2	Alternativas para la inspección automática	20
2.3.3	Alternativas para la clasificación automática	21
2.3.4	Alternativas para el empaquetado	22
2.3.5	Alternativas para el sellado	23
2.4	Criterios de evaluación de las alternativas	24
2.5	Asignación de pesos a los criterios de evaluación	25
2.6	Matriz de decisión y selección de la alternativa	26
2.6.1	Sistema de transporte	27
2.6.2	Sistema de inspección y clasificación	28

2.6.3	Sistema de empaquetado	29
2.6.4	Sistema de sellado	30
2.6.5	Selección final de la solución	31
2.7	Metodología de diseño del sistema automatizado	32
2.7.1	Análisis del problema y definición de requerimientos	32
2.7.1.1	Requerimientos del sistema	33
2.7.2	Definición de la arquitectura del sistema	33
2.7.3	Diseño mecánico del sistema	34
2.7.3.1	Módulo de transporte	34
2.7.3.2	Análisis estructural del módulo de transporte	35
2.7.3.2.1	Modelo estructural considerado	35
2.7.3.2.2	Supuestos y condiciones de carga	36
2.7.3.2.3	Restricciones y condiciones de frontera	37
2.7.3.2.4	Resultados de esfuerzos y deformaciones	38
2.7.3.2.5	Evaluación del factor de seguridad	41
2.7.3.2.6	Conclusión del análisis estructural	42
2.7.3.3	Canal de transferencia	43
2.7.3.4	Soporte mecánico de la cámara de visión artificial	43
2.7.3.5	Módulo de clasificación	44
2.7.3.6	Módulo de sellado	46
2.7.4	Diseño electrónico y de control	48
2.7.4.1	Enfoque del diseño electrónico	48
2.7.4.2	Arquitectura electrónica del sistema	49

2.7.4.2.1	Unidades de control	49
2.7.4.2.2	Sensores del sistema	50
2.7.4.2.3	Actuadores del sistema	51
2.7.4.2.4	Sistema de alimentación eléctrica	53
2.7.4.3	Diseño del sistema de control	57
2.7.4.3.1	Sincronización entre visión artificial y actuadores	58
2.7.4.4	Justificación de la arquitectura electrónica seleccionada	58
2.7.5	Diseño del software y validación	59
2.7.5.1	Diseño del modelo de visión artificial	59
2.7.5.2	Preparación y segmentación del dataset	60
2.7.5.3	Entrenamiento del modelo de clasificación	62
2.7.5.4	Integración del modelo al sistema	62
2.7.5.5	Validación funcional del software	63
2.7.6	Cálculos del sistema	64
2.7.6.1	Dimensionamiento del motor de la banda transportadora	64
2.7.6.2	Cálculo de la velocidad de la banda transportadora	66
2.7.6.3	Justificación de la velocidad de la banda para la detección por visión artificial	69
2.7.6.4	Cálculos del sistema de sellado	69
2.7.6.4.1	Dimensionamiento del elemento calefactor	69
2.7.6.4.2	Cálculo de la resistencia eléctrica	70
2.7.6.4.3	Selección del elemento resistivo	70
2.7.6.4.4	Densidad lineal de potencia	71

Capítulo 3	72
3. Resultados y análisis	73
3.1 Descripción de pruebas realizadas	73
3.2 Resultados del modelo de visión artificial	74
3.2.1 Desempeño del modelo de clasificación	74
3.2.2 Exactitud de clasificación obtenida	74
3.2.3 Simulación del proceso manual	75
3.2.4 Análisis de errores del modelo	76
3.2.5 Tiempo de inferencia y desempeño en tiempo real	76
3.2.6 Alcance y limitaciones del modelo implementado	76
3.3 Sistema de inspección y clasificación automatizada	77
3.3.0.1 Funcionamiento general	78
3.3.0.2 Coordinación entre transporte e inspección	78
3.3.0.3 Rendimiento del sistema de clasificación	78
3.4 Sistema de inspección y clasificación automatizada	79
3.4.0.1 Funcionamiento general	79
3.4.0.2 Coordinación del sistema	80
3.4.0.3 Rendimiento del sistema de empaquetado	80
3.5 Resultados del proceso automatizado vs tradicional	80
3.5.1 Resultados de la etapa de inspección y clasificación	80
3.5.2 Resultados de la etapa de empaquetado y sellado	81
3.6 Análisis del desempeño del sistema	82

3.7	Análisis de costos del prototipo desarrollado	83
3.7.1	Materiales eléctricos y electrónicos	83
3.7.2	Materiales mecánicos y estructurales	86
3.7.3	Costos asociados al sistema de visión artificial	89
3.7.4	Mano de obra	89
3.7.5	Costo total del prototipo	90
3.8	Estudio de factibilidad económica	91
3.9	Comparativa con soluciones del mercado	92
3.9.0.1	Banda transportadora	92
3.9.0.2	Sistema de sellado	93
3.9.0.3	Sistemas comerciales de inspección por visión artificial	93
3.10	Manual de operación	94
3.10.1	Descripción general del sistema	94
3.10.2	Componentes principales	95
3.10.3	Verificaciones previas a la operación	96
3.10.4	Arranque y apagado del prototipo	97
3.10.4.1	Arranque en modo automático	97
3.10.4.2	Arranque en modo manual	98
3.10.4.3	Apagado del prototipo	98
3.11	Manual de mantenimiento	99
3.11.1	Mantenimiento diario	99
3.11.2	Mantenimiento semanal	99
3.11.3	Mantenimiento mensual	100

Capítulo 4	101
4. Conclusiones y recomendaciones	102
4.1 Conclusiones	102
4.2 Recomendaciones	103
Referencias bibliográficas	105
APÉNDICES	109
!	
Apéndice A: Recursos digitales del proyecto	110
A.1 Repositorio de código del sistema	110
A.2 Modelo entrenado y dataset	110
A.3 Archivos de diseño mecánico	111
Apéndice B: Datos técnicos	112
B.1 Apéndice B. Datos técnicos de referencia del sistema	112
Apéndice C: Planos de diseño de los subsistemas	114
Apéndice D: Evidencias de la construcción e implementación del prototipo	140
D.1 Construcción y montaje del sistema de transporte	140
D.2 Sistema de inspección y clasificación	143
D.3 Construcción y montaje del sistema de sellado	145
D.4 Pruebas y validaciones	146

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
IA	Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible (Sustainable Development Goals)
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things)
AIoT	Inteligencia Artificial de las Cosas (Artificial Intelligence of Things)
QC	Control de Calidad (Quality Control)
CNN	Convolutional Neural Network (Red Neuronal Convolutiva)
YOLO	You Only Look Once (Modelo de detección de objetos en tiempo real)
CPU	Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento)
GPU	Graphics Processing Unit (Unidad de Procesamiento Gráfico)
NPU	Neural Processing Unit (Unidad de Procesamiento Neuronal)
FPGA	Field Programmable Gate Array (Arreglo de Puertas Programable en Campo)
PID	Proportional–Integral–Derivative (Controlador Proporcional–Integral–Derivativo)
LDR	Light Dependent Resistor (Fotorresistencia Dependiente de la Luz)
ESP32	Microcontrolador de bajo consumo con conectividad WiFi y Bluetooth

Índice de figuras

Figura 1	Banda transportadora de taco transversal simple (a)	13
Figura 2	Banda transportadora horizontal continua (b)	14
Figura 3	Diseño CAD del módulo de transporte	35
Figura 4	Modelo mallado del módulo de transporte para el análisis por elementos finitos	36
Figura 5	Aplicación de cargas verticales sobre el módulo de transporte	37
Figura 6	Restricciones y condiciones de frontera del módulo de transporte	38
Figura 7	Distribución de tensiones equivalentes de von Mises en el módulo de transporte	39
Figura 8	Distribución de deformación unitaria en el módulo de transporte	40
Figura 9	Desplazamiento total del módulo de transporte bajo carga	41
Figura 10	Distribución del factor de seguridad del módulo de transporte	42
Figura 11	Diseño CAD del canal de transferencia entre el sistema de lavado y el módulo de transporte	43
Figura 12	Diseño CAD del soporte mecánico de la cámara de visión artificial	44
Figura 13	Diseño CAD del módulo de clasificación mediante compuerta desviadora accionada por servomotor	45
Figura 14	Diseño CAD del ensamble del módulo de sellado mediante selladora de banda continua vertical	47
Figura 15	Vista explotada del módulo de sellado y sus componentes principales	47
Figura 16	Esquema eléctrico general del sistema	55
Figura 17	Diseño de la placa Ruteo y organización	56
Figura 18	PCB 3D Disposición física de componentes	57

Figura 19	Ejemplo del proceso de etiquetado de mangos aptos en Roboflow	61
Figura 20	Ejemplo del proceso de etiquetado de mangos no aptos en Roboflow	61
Figura 21	Salida del sistema de clasificación en tiempo real generada por el modelo de visión artificial	63
Figura 22	Metodología de diseño del sistema automatizado	64
Figura 23	Simulación del proceso manual de inspección visual de mangos	75
Figura 24	Corte de las partes MDF	141
Figura 25	Armado de estructura de aluminio	142
Figura 26	Montaje inicial del sistema de transporte	142
Figura 27	Montaje final del sistema de transporte	143
Figura 28	Matriz de confusión del modelo entrenado	144
Figura 29	Montaje de la estructura para la inspección y clasificación	144
Figura 30	Detección de mangos buenos y defectuosos en la etapa de inspección	145
Figura 31	Decisión del modelo y envío de señal al microcontrolador	145
Figura 32	Construcción del sistema de sellado	146
Figura 33	Montaje final del sistema de sellado y empaquetado	146
Figura 34	Ajustes de conexiones en el tablero eléctrico	147
Figura 35	Banda transportadora en operación	147
Figura 36	Producto empaquetado y sellado final	148

Índice de tablas

Tabla 2.1	Pesos asignados a los criterios de evaluación	26
Tabla 2.2	Matriz de decisión para el sistema de transporte	28
Tabla 2.3	Matriz de decisión para el sistema de inspección	29
Tabla 2.4	Matriz de decisión para el sistema de empaquetado	30
Tabla 2.5	Matriz de decisión para el sistema de sellado	31
Tabla 2.6	Sensores empleados en el sistema automatizado	51
Tabla 2.7	Actuadores empleados en el sistema automatizado	53
Tabla 2.8	Fuentes de alimentación empleadas en el sistema automatizado	54
Tabla 2.9	Comparación de la velocidad de la banda transportadora	68
Tabla 2.10	Parámetros eléctricos del sistema de sellado	71
Tabla 3.1	Resultados de la inspección automatizada vs manual	81
Tabla 3.2	Resultados del empaquetado y sellado automatizado vs manual	82
Tabla 3.3	Comparación de tiempos entre proceso manual y automatizado	82
Tabla 3.4	Materiales eléctricos y electrónicos de la banda transportadora	84
Tabla 3.5	Materiales eléctricos y electrónicos del sistema de sellado	85
Tabla 3.6	Resumen de costos de materiales eléctricos y electrónicos	85
Tabla 3.7	Materiales mecánicos y estructurales de la banda transportadora	87
Tabla 3.8	Materiales mecánicos y estructurales del sistema de sellado	88
Tabla 3.9	Resumen de costos de materiales mecánicos y estructurales	88
Tabla 3.10	Mano de obra empleada en la construcción del prototipo	90
Tabla 3.11	Costo total del prototipo desarrollado	90

Tabla B.1	Características técnicas del motor reductor DC 25GA370	112
Tabla B.2	Características técnicas de los servomotores MG955 y MG995	113
Tabla B.3	Ampicidad del hilo de nicrom en función de la temperatura	113

Capítulo 1

1. Introducción

En la actualidad, las comunidades agrícolas rurales continúan enfrentando dificultades en las etapas posteriores a la cosecha, especialmente en los procesos de selección y empaquetado de los productos. Estas tareas, realizadas de forma manual, generan variaciones en la calidad, pérdida de tiempo y una presentación poco uniforme que afecta la competitividad de los productores en los mercados locales y externos.

A pesar de los avances tecnológicos en el ámbito agroindustrial, muchas comunidades aún no cuentan con herramientas accesibles para automatizar sus procesos. Esto limita la productividad, incrementa el esfuerzo físico y reduce el valor agregado del producto final. En particular, la ausencia de sistemas automatizados de control de calidad y empaquetado impide asegurar la trazabilidad y presentación profesional de los alimentos que llegan al consumidor.

Este proyecto busca desarrollar una solución tecnológica accesible y adaptable a contextos rurales, capaz de automatizar las tareas de inspección, clasificación y empaquetado de los sistemas industriales de alto costo, la propuesta se apoya en el uso de sistemas embebidos y un modelo de IA optimizado para operar en dispositivos de bajo consumo, como microcontroladores o plataformas de cómputo.

La integración de estos elementos permitirá identificar características del producto como color o defectos visibles como los que se originan por condiciones ambientales, hongos o bacterias, golpes o cortes, para posteriormente empaquetarlos de forma correcta. De esta forma, se busca fortalecer el valor comercial del producto, reducir el desperdicio y promover el uso de tecnologías sostenibles en comunidades agrícolas.

Más allá del aspecto técnico, este desarrollo tiene un enfoque social y económico. Por

un lado, reduce la carga física y el tiempo de trabajo de los productores; y por otro, impulsa la inserción tecnológica en sectores rurales, fomentando nuevas oportunidades de capacitación y emprendimiento local. El resultado esperado es un prototipo funcional de bajo costo, replicable y escalable, que pueda ser implementado por asociaciones agrícolas o pequeñas cooperativas.

1.1 Descripción del problema

En diversos sectores rurales del país, el manejo postcosecha de frutas sigue dependiendo de métodos manuales y artesanales. Las tareas de selección y empaquetado son realizadas sin instrumentos de medición o control visual preciso, lo que provoca irregularidades en la presentación del final producto, daños físicos y pérdida de calidad. Esto limita la capacidad de los productores para cumplir con los estándares de comercialización exigidos por los mercados formales.

La falta de automatización también incrementa los costos laborales y reduce la eficiencia del proceso, generando desperdicio y pérdida de competitividad frente a productos industrializados. En la mayoría de los casos, los pequeños agricultores no cuentan con recursos suficientes para adquirir maquinaria importada, cuyo precio supera ampliamente sus posibilidades económicas.

Además, la ausencia de sistemas de control de calidad hace difícil garantizar la trazabilidad del producto. En muchos casos, los consumidores desconocen el origen o las condiciones del cultivo, lo que reduce la confianza en el producto y afecta su valor comercial. Esta situación repercute directamente en los ingresos de las familias rurales y limita el desarrollo del sector agroindustrial comunitario.

En este contexto, se identifica la necesidad de diseñar un sistema que pueda

inspeccionar, clasificar y empaquetar el producto de manera automática, utilizando sensores, cámaras y algoritmos simples de IA integrados en un sistema embebido de bajo costo. Esta herramienta permitiría modernizar las etapas de postcosecha y mejorar la calidad final sin requerir infraestructura compleja o personal altamente especializado.

1.2 Justificación del problema

La propuesta se justifica por la necesidad urgente de modernizar los procesos postcosecha de los pequeños productores, promoviendo soluciones tecnológicas sostenibles, económicas y fáciles de implementar. En zonas rurales, donde los recursos son limitados y el trabajo realizado por los operarios es intensiva, la incorporación de sistemas automáticos representa un avance significativo hacia una producción más eficiente, higiénica y competitiva.

En el sector poscosecha, se reflejan brechas en la estandarización de procesos, control de calidad y mermas por daño mecánico o contaminación. Estas limitaciones afectan a pequeños productores, donde predominan operaciones manuales, restricción de capital y limitada capacitación técnica. La ausencia de prácticas sistemáticas de lavado, inspección, clasificación y empaque, dificulta cumplir especificaciones y estándares comerciales exigidas por mercados de mayor valor, reduciendo la competitividad y la estabilidad de ingresos.

Desde el punto de vista social, el proyecto busca mejorar las condiciones laborales al reducir tareas repetitivas y físicamente exigentes. En el ámbito económico, genera valor agregado al producto al asegurar una presentación profesional y confiable. Finalmente, en el aspecto ambiental, promueve el uso eficiente de recursos y la reducción del desperdicio alimentario, contribuyendo a los ODS relacionados con trabajo digno, innovación e

industrialización sostenible.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una máquina automatizada para el lavado, inspección, clasificación y empaquetado de frutas, mediante un sistema de visión artificial, para mejorar la calidad del producto y facilitar su comercialización.

1.3.2 Objetivos específicos

- Rediseñar la estructura de la planta automatizada con sus distintas etapas de lavado, transporte y selección de frutas, incorporando los ajustes mecánicos, eléctricos y de control requeridos para su operación continua y segura.
- Implementar un sistema de inspección por visión artificial con un sistema de control avanzado, capaz de identificar las frutas según su nivel de madurez, color o defectos, integrando sensores, cámaras y procesamiento embebido dentro de la línea de producción.
- Diseñar e implementar un prototipo electromecánico de empaquetado y sellado automático, sincronizado con la etapa de clasificación, que permita obtener un producto final listo para su comercialización, adaptado a las condiciones y necesidades de los pequeños productores.

1.4 Marco teórico

1.4.1 *Automatización en procesos de clasificación y control de calidad de frutas*

La automatización de los procesos postcosecha en la agroindustria ha cobrado relevancia como una alternativa para mejorar la eficiencia y calidad en la clasificación de frutas. Diversos estudios evidencian que los métodos manuales tradicionales presentan limitaciones asociadas a la subjetividad del operador, variabilidad en los criterios de selección y baja repetibilidad, lo que repercute negativamente en la consistencia del producto final. En este contexto, la incorporación de sistemas automáticos basados en visión por computadora se ha consolidado como una solución viable para evaluar parámetros físicos y visuales de las frutas, tales como tamaño, forma, color y presencia de defectos superficiales.

Investigaciones han demostrado la factibilidad de implementar sistemas de clasificación automática de frutas mediante cámaras digitales y algoritmos de procesamiento de imágenes, logrando una mejora significativa en la precisión y velocidad del proceso en comparación con la inspección manual. Estos sistemas permiten una evaluación objetiva y continua del producto, reduciendo la dependencia del trabajo humano y optimizando la operación en líneas de procesamiento postcosecha [1].

Asimismo, estudios recientes reportan el desarrollo de prototipos y sistemas experimentales que integran visión artificial para la clasificación y organización de frutas según criterios de calidad y madurez, evidenciando una reducción de pérdidas y una mayor uniformidad en la selección del producto. La adopción de este tipo de tecnologías representa un avance importante hacia la modernización de los procesos agroindustriales, al facilitar la implementación de mecanismos de control de calidad más confiables y repetibles, adaptables

a diferentes tipos de frutas y escalables para pequeños y medianos productores [2].

1.4.2 Sistemas embebidos y su aplicación en la agricultura

Los sistemas embebidos basados en el Internet de las Cosas (IoT) están transformando la agricultura moderna al permitir un monitoreo y control en tiempo real de los procesos productivos. Estos sistemas integran sensores, microcontroladores, módulos de comunicación y plataformas de análisis de datos que trabajan de forma coordinada para recopilar información del entorno agrícola, como humedad del suelo, temperatura, intensidad lumínica y niveles de nutrientes. Los datos recolectados se transmiten a plataformas en la nube, donde son procesados mediante algoritmos de aprendizaje automático que facilitan la toma de decisiones precisas y oportunas. Gracias a esta arquitectura, los agricultores pueden optimizar el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir el impacto ambiental de las operaciones agrícolas.

Por otra parte, el diseño de estos sistemas embebidos para agricultura se basa en una estructura de tres capas: percepción, red y aplicación. En la capa de percepción se concentran los sensores y dispositivos encargados de obtener los datos del entorno; la capa de red garantiza la comunicación eficiente entre los distintos nodos mediante tecnologías incorporadas; y la capa de aplicación convierte la información procesada en acciones concretas, como el control automático del riego, la climatización de invernaderos o la detección de plagas. La incorporación de estos sistemas no solo incrementa la productividad, sino que también impulsa una agricultura más sostenible y tecnológica. [3].

1.4.3 Visión e inteligencia artificial aplicada al control de calidad

La visión artificial, combinada con técnicas de inteligencia artificial, se ha convertido en una herramienta esencial para el control de calidad en entornos industriales. La implementación de sistemas de inspección automatizados basados en análisis de imágenes permite detectar defectos, irregularidades y desviaciones con un nivel de precisión superior al de la inspección visual humana. Estos sistemas integran cámaras de alta resolución, algoritmos de procesamiento digital y redes neuronales profundas que aprenden a identificar patrones asociados con productos conformes y no conformes. De esta manera, la inteligencia artificial mejora la capacidad de adaptación de los sistemas de visión al reconocer nuevas variaciones o defectos sin necesidad de reprogramación manual. Esta integración reduce los errores humanos, optimiza los tiempos de inspección y eleva la consistencia del proceso de control de calidad. [4].

1.4.4 Aprendizaje profundo para la inspección visual automatizada

El aprendizaje profundo permite el análisis automatizado de imágenes con un nivel de detalle y precisión difícil de alcanzar mediante algoritmos tradicionales. Las redes neuronales profundas demuestran una gran capacidad para identificar patrones complejos, clasificar defectos y reconocer variaciones mínimas en la textura, forma o color de los productos. Estas arquitecturas aprenden de grandes volúmenes de datos mediante procesos de entrenamiento supervisado o no supervisado, adaptando sus parámetros internos para mejorar el rendimiento con cada iteración. En el ámbito del control de calidad, el uso de modelos de aprendizaje profundo permite una detección más rápida y confiable de fallas en líneas de producción, reduciendo la dependencia del juicio humano y mejorando la consistencia en la evaluación de

la calidad del producto [5].

1.4.5 Plataformas embebidas y controladores para modelos de IA

La incorporación de la inteligencia artificial en sistemas industriales ha dado lugar a distintas arquitecturas de procesamiento para aplicaciones de visión artificial y control automático.

Diversos estudios reportan el empleo de plataformas como NVIDIA Jetson, Raspberry Pi y sistemas basados en FPGA o microcontroladores especializados para la ejecución de algoritmos de visión artificial y aprendizaje profundo en aplicaciones agrícolas. Estas soluciones demuestran ser capaces de realizar inferencia local bajo consumo, manteniendo un desempeño adecuado para tareas como la inspección visual, detección de defectos y clasificación de productos agrícolas. También se destaca que la integración de estos sistemas permite mejorar la precisión y repetibilidad del control de calidad. [6].

Adicionalmente, se ha documentado el uso de arquitecturas híbridas en las que el procesamiento intensivo de imágenes y la ejecución del modelo de inteligencia artificial se realizan en un sistema de mayor capacidad de cómputo, mientras que los microcontroladores embebidos se encargan de las tareas de control, comunicación y accionamiento. Este tipo de distribución funcional permite evita el alto consumo computacional, incrementando la robustez y flexibilidad del sistema. En el contexto agroindustrial, estas arquitecturas han sido identificadas como una alternativa viable para la implementación de sistemas de inspección y clasificación automática, al combinar desempeño, bajo costo y facilidad de integración en líneas de procesamiento postcosecha. [7].

1.4.6 Etapa de lavado de frutas

El lavado de los productos agrícolas como frutas, es fundamental en las líneas agroindustriales de procesamiento de frutas, donde el objetivo principal es eliminar la suciedad que recubre el producto, ya que se pueden albergar microorganismos o residuos químicos, previo a las etapas de inspección, clasificación y empaque.

Según la literatura de procesamiento postcosecha de la Food and Agriculture Organization (FAO), los métodos más usados para el lavado de fruta son el de inmersión y chorros o una combinación de ambos, destacando que la inmersión es ampliamente usada para frutas que flotan o requieren tratamiento suave [8].

Entre los métodos de lavado para frutas y hortalizas utilizados en el amplio campo de esta industria podemos destacar algunos de los más empleados que además funcionan muy bien en conjunto:

1.4.6.1 Método de lavado por aspersión

El lavado por aspersión se basa en hacer pasar las frutas por un canal con una serie de boquillas que disparan chorros de agua a presión o flujo controlado, donde el agua también puede contener solución de lavado. El objetivo de este método es remover la suciedad, residuos, partículas adheridas o restos de agroquímicos contenidos en la superficie del fruto.

En plantas automatizadas encargadas del procesamiento de frutas, el método de lavado por aspersión permite un flujo continuo y una integración más sencilla con bandas transportadoras, ya que el producto tiene la libertad de moverse por debajo de los canales con boquillas sin la necesidad de recipientes o tanque profundos como en el caso del lavado por

inmersión [9].

1.4.6.2 Método de lavado por inmersión

El proceso de lavado por inmersión consiste en sumergir la fruta en un recipiente como tanque o tina con agua (se puede agregar una solución de lavado) durante un tiempo prolongado, y con la ayuda de una bomba hidráulica se hace circular agua para generar burbujeo y agitación para remover suciedad y partículas adheridas a la fruta. Posteriormente se realiza el enjuague, drenaje o extracción.

Según un artículo de revisión, el lavado por inmersión ofrece una mayor cobertura de superficie para eliminar microorganismo, pero al mismo tiempo también conlleva una amenaza mayor de contaminación cruzada, dado que varias muestras se encuentran sumergidas en un mismo líquido. En el experimento realizado con tratamiento peróxido de hidrógeno y agua caliente a manzanas con la técnica de inmersión lograron eliminar las bacterias en un 99,9% pero no se llegó a la eliminación total del 99,999% exigida por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) del país [10].

1.4.7 Etapa de transporte de frutas

En plantas de lavado y procesamiento de fruta es común ver como combinan: (a) elevadores inclinados con tacos para ganar altura y evitar el retroceso durante la pendiente, y (b) bandas horizontales de grado alimentario (lisas o modulares plásticas) previo a la etapa de inspección y clasificación.

La utilización de bandas modulares plásticas y diseños higiénicos facilita el cuidado del lugar y reduce riesgos microbiológicos y al ser de este material aumenta la flexibilidad de la banda y facilita la instalación, por otro lado, ese diseño facilita el reconocimiento del modelo

entrenado gracias a la superficie plana o lisa de la banda. Mientras que las bandas con tacos es más bien una solución estándar cuando hay pendiente o riesgo de deslizamiento del producto [11].

1.4.7.1 Elevador de banda con tacos o estrías

Para transportar productos unitarios como frutas en pendientes pronunciadas, es necesario que la banda transportadora a usar tenga una superficie con una estructura rugosa que frene la fruta del desliz. Para esto, se puede instalar particiones transversales, conocidas como “tacos”, en la banda para generar una serie de compartimentos que eviten el deslizamiento o retroceso del producto durante el ascenso.

El diseño de estos sistemas es crítico, ya que el rendimiento del transporte depende directamente de la altura de las estrías y de su espaciamiento a lo largo de la banda. Estudios demuestran que es posible determinar matemáticamente el volumen de material que cada “taco” puede contener, para así poder optimizar un flujo continuo y maximizar la capacidad de transporte, la validez de estos modelos teóricos ha sido confirmada mediante experimentación en condiciones controladas[12].

Como se observa en la Figura 1, las bandas transportadoras con tacos transversales permiten evitar el retroceso de las frutas cuando el transporte se realiza en pendientes. Estos elementos generan compartimentos que mantienen el producto en su posición durante el desplazamiento, lo que facilita un flujo continuo y reduce el riesgo de deslizamiento o daño mecánico.

Figura 1

Banda transportadora de taco transversal simple (a)



Nota: Tomado del catálogo técnico de Esbelt [11].

1.4.7.2 Transportador horizontal de banda continua

Después del proceso de lavado se requiere de un medio de transporte que mantenga el producto estable para permitir su inspección y clasificación. Las bandas horizontales de grado alimentario brindan una superficie continua que evita el rodamiento de las frutas, además reduce el daño mecánico por impacto de caída y asegura un flujo constante hacia la siguiente etapa del proceso. La selección de una banda transportadora horizontal continua se justifica por su versatilidad, eficiencia energética y amplia adopción en industrias de varios tipo, tales como, minería, manufactura y logística [13].

Según Deka este tipo de transportador es uno de los más comunes en cuanto al manejo de material a granel debido a su buena capacidad para llevar grandes cantidades del producto a distancias cortas y medias de manera continua y confiable. Asimismo, su diseño facilita la

integración con sistemas de control automático y con sensores, alineándose con los requisitos de la industria 4.0 [13].

Figura 2

Banda transportadora horizontal continua (b)



Nota: Tomado del catálogo técnico de Esbelt [11].

La Figura 2 muestra un ejemplo de una banda transportadora horizontal continua utilizada en procesos agroindustriales. Este tipo de transportador proporciona una superficie estable que permite mantener la fruta en posición durante el desplazamiento, facilitando la inspección visual o automática antes de las etapas de clasificación y empaquetado.

1.4.8 Métodos de clasificación de frutas

1.4.8.1 Clasificación manual

En procesos donde el presupuesto es limitado o la producción no justifica la automatización completa, la clasificación realizada de manera manual continúa siendo una opción funcional y ampliamente aplicada en la manipulación de frutas y hortalizas. En este

método, personal capacitado examina cada producto de forma visual y táctil, separándolo según parámetros definidos previamente, tales como su grado de madurez, dimensiones, tonalidad o presencia de daños físicos.

De acuerdo con Kitinoja y Kader [14], la clasificación manual puede realizarse en mesas o cintas transportadoras diseñadas ergonómicamente para minimizar la fatiga del operador y maximizar la eficiencia. Se recomienda que las superficies de trabajo estén inclinadas entre 12° y 15°, que la altura de la mesa sea ajustable y que la iluminación sea adecuada (entre 500 y 1000 lux) para facilitar la detección de imperfecciones.

1.4.8.2 Clasificación con sensores fotoeléctricos

El uso de sensores fotoeléctricos es una técnica efectiva para la clasificación automática de frutas por tamaño. En un prototipo de máquina clasificadora, se emplean sensores de posición del tipo emisor-receptor, que consisten en un diodo láser como fuente de luz y una fotorresistencia (LDR) como elemento receptor.

Este sistema se basa en la interrupción del haz de luz: cuando una fruta pasa por la banda transportadora, interrumpe el haz láser que incide sobre la LDR, lo que provoca un cambio en su resistencia eléctrica. Este cambio se convierte en una señal eléctrica que el sistema de control interpreta para determinar el tamaño del fruto [15].

1.4.9 Etapa de sellado y empaquetado

Los sistemas de sellado se seleccionan según el material del empaque (rollos de plástico, bolsas, bandejas termoformadas, etc.) y el nivel de automatización requerido.

1.4.9.1 Sellado por calor

En el contexto del diseño de máquinas empacadoras para productos granulados, el sellado por calor se presenta como una técnica ampliamente utilizada para la unión de láminas poliméricas. Según el proyecto de Gutiérrez [16], este método se basa en la aplicación de calor controlado sobre el material polimérico, lo que permite fundirlo en su interior y formar un sello hermético y resistente una vez que se enfría. Este método se puede realizar de forma manual, semiautomática o en banda continua.

1.4.9.2 Sellado por vacío

El sellado al vacío es un método de conservación excepcional y eficaz por tener la capacidad de eliminar el oxígeno del entorno del alimento, que es el factor principal responsable de los procesos de deterioro de la mayoría de los alimentos. Al crear un ambiente con una presión interna significativamente reducida, este método inhibe de forma directa dos mecanismos clave de degradación: el crecimiento microbiano y las reacciones de oxidación [17].

El proceso físico se realiza mediante termo soldado, donde una resistencia eléctrica (níquelina) ubicada en una mordaza móvil se calienta y es presionada contra el empaque plástico (sostenido por una mordaza fija) dentro de la cámara ya evacuada. La combinación de calor y presión funde el plástico, creando un sello hermético [17].

Capítulo 2

2. Metodología

2.1 Enfoque metodológico general

El prototipo se desarrolló con un enfoque de diseño mecatrónico, integrando componentes mecánicos, electrónicos, visión artificial y control, con el fin de automatizar el transporte, inspección, clasificación y empaque de frutas mediante mecanismos de bajo costo adecuados para pequeños productores rurales. La planta ya contaba con la etapa de lavado (tina de acero inoxidable, bomba de circulación, tablero eléctrico y elevador de banda con tacos), por lo que el proyecto se centró desde la salida del elevador, diseñando e integrando los módulos restantes: transporte hacia inspección, visión artificial para detección de defectos, clasificación automática, empaquetado y sellado.

2.2 Etapas incorporadas

El aporte del presente diseño comenzó a partir del punto donde las frutas salieron del elevador. Para cubrir las necesidades identificadas en el Capítulo 1, se implementaron las siguientes etapas adicionales:

1. Sistema de transporte hacia la etapa de inspección, encargado de recibir las frutas desde el elevador y desplazarlas de manera continua y controlada.
2. Sistema de inspección por visión artificial, basado en segmentación y detección de imágenes mediante una red neuronal convolucional para identificar mangos buenos y malos.
3. Sistema de clasificación automática, mediante un actuador que desviaba los mangos

rechazados a un canal secundario.

4. Sistema de empaquetado, que permitió la acumulación de 4 o 5 mangos aptas dentro de una funda.
5. Sistema de sellado automático, encargado de cerrar la funda mediante calor y cortar cada empaque individual.
6. Unidad de control embebido, basada en un ESP32, que coordinó motores, sensores, actuadores y algoritmos.

2.3 Formulación de alternativas de solución

En esta sección se presentan las alternativas evaluadas para cada una de las etapas diseñadas. La formulación se fundamentó en literatura sobre manejo poscosecha, automatización industrial y sistemas de inspección basados en visión artificial.

2.3.1 Alternativas para el transporte hacia la inspección

Una vez que la fruta era extraída del agua, fue necesario seleccionar un mecanismo capaz de desplazarla suavemente hacia la estación de inspección, manteniendo un flujo estable y una velocidad controlada.

- **Alternativa 1: Banda continua lisa**

La banda continua es ampliamente utilizada en el transporte de frutas debido a su suavidad, uniformidad y capacidad de integración con sistemas de visión artificial. Permite ajustar la velocidad mediante control de motor y reduce el daño mecánico en productos redondeados.

- **Alternativa 2: Banda modular plástica**

Compuesta por eslabones o módulos interconectados. Presenta alta durabilidad y permite reemplazar segmentos individuales. Es común en industria alimentaria por su limpieza y ventilación. Sin embargo, puede generar vibraciones que afectan la estabilidad de la fruta durante la inspección.

- **Alternativa 3: Transportador de rodillos** Común en productos rígidos o empacados, pero inadecuado para frutas esféricas, ya que tienden a desalinearse o caer entre rodillos. Se descartó por riesgo de daño y falta de control.

2.3.2 Alternativas para la inspección automática

Cuando la fruta llega a la estación de inspección, se requiere un sistema automatizado y sin contacto que evaluara objetivamente su calidad, ya que esta etapa definió la correcta clasificación del producto antes del empaque. Por ello, se analizaron diversas alternativas de solución, entre ellas:

Alternativa 1: Uso de sensores ópticos de color

Se basa en el uso de sensores ópticos que analizan parámetros específicos como el color promedio, intensidad de luz o reflectancia superficial del fruto. El sistema compara estos valores con otros rangos para determinar si la fruta cumple o no con los criterios de calidad establecidos. Este tipo de sistemas depende mucho de que la iluminación sea siempre la misma, lo cual dificulta su uso en condiciones reales de trabajo donde la luz puede variar.

Alternativa 2: Procesamiento de imágenes con reglas predefinidas

Emplea cámaras y algoritmos clásicos (segmentación, umbralización, análisis de áreas) con reglas predefinidas; es sensible a iluminación y orientación, y requiere ajustes manuales

frecuentes, afectando la consistencia.

Alternativa 3: Visión artificial basada en redes neuronales convolucionales

Esta alternativa emplea técnicas de visión artificial mediante redes neuronales convolucionales para la detección y clasificación automática de frutas. El sistema analiza características visuales como color, textura, forma y presencia de defectos directamente a partir de imágenes capturadas por una cámara.

2.3.3 Alternativas para la clasificación automática

Tras la inspección, el sistema debía separar las frutas clasificadas como “no aptas” para evitar que entren en el proceso de empaquetado. Para esta etapa se evaluaron diversos mecanismos de desvío utilizados en líneas de poscosecha.

- **Alternativa 1: Brazo servo-mecánico de pequeño alcance**

Consiste en el uso de un brazo servo-mecánico debido a que la clasificación de fruta requiere movimiento suave y rutas múltiples, y el servomotor es la única tecnología que ofrece el control de precisión necesario para proteger la calidad del producto final y manejar la complejidad de la clasificación.

- **Alternativa 2: Solenoide de empuje lateral**

El solenoide genera un movimiento lineal rápido capaz de empujar la fruta defectuosa hacia un trayecto alternativo. Se controla el mecanismo como una válvula, usando fuerza electromagnética y es usado en aplicaciones donde requieren fuerza con desplazamiento corto.

- **Alternativa 3: Actuador neumático**

Uso de un pistón neumático para desviar la fruta hacia otro canal. Ideal para la tarea de desvío de productos defectuosos porque proporciona el equilibrio óptimo entre velocidad, fuerza, simplicidad y costo en un entorno industrial que valora la higiene y la eficiencia de los movimientos rápidos de tipo on-off.

2.3.4 Alternativas para el empaquetado

La etapa de empaquetado consistió en agrupar un número definido de frutas (4 o 5 unidades) dentro de una funda, asegurando consistencia y preparación para el sellado posterior. Se consideraron varias alternativas:

- **Alternativa 1: Empaque por conteo mediante sensores IR**

En líneas industriales de pequeña y mediana escala, es común emplear sistemas de conteo por barreras infrarrojas para detectar la caída individual de frutas u hortalizas dentro de una funda o contenedor. El sensor registra cada unidad al interrumpirse el haz de luz y permite detener momentáneamente la banda o activar un mecanismo de separación cuando se alcanza el número programado.

- **Alternativa 2: Empaque mediante bandejas preformadas**

El uso de bandejas termoformadas es una alternativa ampliamente utilizada en la industria frutícola, especialmente para productos de exportación como manzanas, peras o cítricos. Las bandejas se fabrican generalmente en PET, polipropileno expandido (EPP) o pulpa moldeada, y están diseñadas para inmovilizar cada fruta en una cavidad individual, reduciendo daños por vibración durante el transporte.

- **Alternativa 3: Sistema flow-pack**

Estándar en plantas agroindustriales de alta producción. Consiste en una línea continua donde las frutas ingresan a una funda tubular formada a partir de un rollo de plástico, la cual es sellada longitudinal y transversalmente por mordazas rotativas.

2.3.5 Alternativas para el sellado

Tras la agrupación de las frutas, se evaluaron distintos métodos para cerrar la funda, asegurando hermeticidad y un empaque apto para comercialización.

- **Alternativa 1: Sellado térmico por calor**

Es uno de los métodos más utilizados en la industria alimentaria. Funciona mediante la aplicación de calor controlado para fundir y unir las capas de una bolsa de polietileno (PE), polipropileno (PP) o laminados. Existen dos variantes principales, por impulso donde las mordazas se calientan solo durante el momento del sellado. Muy eficiente energéticamente, y sellado de calor constante donde las mordazas permanecen calientes de forma continua, típicamente usado en líneas de mayor velocidad.

- **Alternativa 2: Selladora de banda continua**

La selladora de banda continua es ampliamente usada en plantas industriales pequeñas y medianas, especialmente en productos alimenticios y empaques flexibles. En este sistema, la funda avanza sobre una banda transportadora que atraviesa un par de mordazas calefactoras recubiertas en PTFE, generando un sellado uniforme mientras el paquete se mueve de manera continua.

- **Alternativa 3: Sellado al vacío**

El sellado al vacío se emplea para productos que requieren prolongar su vida útil o evitar

oxidación. El sistema extrae el aire del interior del empaque y luego realiza un sellado térmico hermético.

2.4 Criterios de evaluación de las alternativas

Con el fin de seleccionar la alternativa más adecuada para cada etapa del sistema automatizado, se definieron criterios técnicos que permitieron comparar objetivamente las opciones planteadas. Estos criterios se establecieron considerando las condiciones reales del proyecto, las limitaciones del entorno rural, la integración con los sistemas existentes y los objetivos funcionales del prototipo.

Dado que el sistema debía operar de forma continua, confiable y sincronizada, la evaluación se enfocó en el desempeño del proceso, la calidad del producto, la viabilidad de implementación y la sostenibilidad del diseño. Los criterios considerados fueron:

- Costo de implementación: evaluó el impacto económico de cada alternativa, priorizando soluciones replicables y de bajo costo para pequeños productores.
- Facilidad de integración: analizó la compatibilidad con la infraestructura existente (banda elevadora y panel de control), favoreciendo opciones con mínimas modificaciones.
- Control del proceso: consideró la posibilidad de controlar velocidad, sincronización y repetibilidad, especialmente en etapas críticas como transporte e integración con visión artificial y sellado.
- Daño mecánico al producto: evaluó el impacto físico sobre la fruta, priorizando alternativas que minimicen golpes o presiones y preserven la calidad.
- Complejidad técnica: valoró el nivel de complejidad mecánica, electrónica y de

programación, buscando un equilibrio entre funcionalidad y simplicidad.

- Facilidad de mantenimiento: consideró la inspección, limpieza y reparación, relevante por la limitada disponibilidad de soporte técnico en zonas rurales.
- Adaptabilidad al entorno rural: evaluó la operación confiable ante variaciones ambientales, disponibilidad de repuestos y facilidad de uso y capacitación.

2.5 Asignación de pesos a los criterios de evaluación

Una vez definidos los criterios de evaluación, se estableció su importancia relativa para reflejar su impacto en el desempeño global del sistema. Para ello, se aplicó un método de ponderación porcentual, distribuyendo un total de 100 puntos entre los criterios según su relevancia técnica, funcional y económica.

La asignación de pesos consideró los objetivos del sistema automatizado: asegurar un flujo continuo y controlado del producto, garantizar la correcta operación del sistema de visión artificial, reducir el daño mecánico a las frutas y mantener la viabilidad de implementación en entornos rurales. Por esta razón, los criterios con influencia directa en la calidad del proceso y la sincronización entre etapas recibieron mayor ponderación.

En particular, control del proceso fue priorizado por su relación con la inspección por visión artificial y el sellado automático. Asimismo, daño mecánico al producto obtuvo una ponderación elevada debido a la sensibilidad de las frutas y la necesidad de preservar su calidad. Adicionalmente, costo de implementación y facilidad de mantenimiento fueron valorados por el enfoque del proyecto hacia pequeños productores y condiciones de recursos limitados.

Finalmente, complejidad técnica, facilidad de integración y adaptabilidad al entorno

rural permitieron evaluar la practicidad y sostenibilidad de la solución, asegurando que el sistema fuese funcional, replicable y operable por usuarios no especializados.

La Tabla 2.1 presenta la distribución de los pesos asignados a cada uno de los criterios de evaluación considerados en el proceso de selección de alternativas.

Tabla 2.1.

Pesos asignados a los criterios de evaluación

Criterio	Peso
Control del proceso	0.25
Daño mecánico al producto	0.20
Costo de implementación	0.15
Facilidad de mantenimiento	0.15
Facilidad de integración	0.10
Complejidad técnica	0.10
Adaptabilidad al entorno rural	0.05
Total	1.00

2.6 Matriz de decisión y selección de la alternativa

Con los criterios de evaluación definidos y los pesos asignados, se elaboró la matriz de decisión para comparar las alternativas de cada etapa del sistema. Esta herramienta permitió una evaluación estructurada y objetiva de las opciones disponibles, facilitando la selección de la alternativa más adecuada según los requerimientos técnicos, económicos y operativos del proyecto. Para la construcción de la matriz se empleó una escala de calificación discreta de 1 a

5, donde:

- 1 representó un desempeño deficiente respecto al criterio evaluado,
- 3 un desempeño aceptable,
- 5 un desempeño sobresaliente.

Cada alternativa fue evaluada frente a todos los criterios definidos en la Sección 2.4. Posteriormente, las calificaciones se multiplicaron por el peso correspondiente de cada criterio y se sumaron para obtener un puntaje ponderado total, el cual permitió identificar la alternativa más conveniente.

2.6.1 Sistema de transporte

Para la etapa de transporte se evaluaron las siguientes alternativas:

- **A1:** Banda transportadora continua lisa
- **A2:** Banda modular plástica
- **A3:** Transportador de rodillos

Tabla 2.2.*Matriz de decisión para el sistema de transporte*

Criterio	Peso	Banda lisa	Banda modular	Rodillos
Control del proceso	0,25	5	4	2
Daño mecánico	0,20	5	4	1
Costo	0,15	4	3	3
Mantenimiento	0,15	4	3	3
Integración	0,10	5	4	3
Complejidad	0,10	4	3	3
Entorno rural	0,05	4	3	3
Total	1,00	4,55	3,55	2,35

Del análisis de la matriz en la Tabla 2.2 se determinó que la banda transportadora continua lisa obtuvo el mayor puntaje ponderado. Esta alternativa destacó principalmente por su capacidad de control de velocidad, estabilidad del producto y facilidad de integración con el sistema de inspección por visión artificial.

2.6.2 Sistema de inspección y clasificación

Para la inspección automática de las frutas se consideraron las siguientes alternativas:

- **B1:** Visión artificial basada en redes neuronales convolucionales.
- **B2:** Sensores fotoeléctricos / sensores de color
- **B3:** Procesamiento de imágenes tradicional basado en reglas

Tabla 2.3.*Matriz de decisión para el sistema de inspección*

Criterio	Peso	CNN	Sensores	Visión clásica
Control del proceso	0,25	5	3	3
Daño mecánico	0,20	5	5	5
Costo	0,15	4	5	4
Mantenimiento	0,15	4	4	3
Integración	0,10	5	3	3
Complejidad	0,10	3	4	3
Entorno rural	0,05	4	4	3
Total	1,00	4,45	4,00	3,55

Los resultados de la tabla 2.3 indicaron que la inspección mediante visión artificial basada en redes neuronales convolucionales con transfer learning fue la alternativa más adecuada. Esta opción destacó por su alta precisión en la detección de defectos visibles, su adaptabilidad ante variaciones de iluminación y orientación del fruto, y su integración con el sistema de transporte controlado.

2.6.3 Sistema de empaquetado

Para la etapa de empaquetado se evaluaron las siguientes alternativas:

- **C1:** Bandejas preformadas
- **C2:** Sistema flow-pack
- **C3:** Canal de acumulación con empuje mecánico

Tabla 2.4.*Matriz de decisión para el sistema de empaquetado*

Criterio	Peso	Bandejas	Flow-pack	Empuje
Control del proceso	0,25	3	5	3
Daño mecánico	0,20	5	4	3
Costo	0,15	3	1	3
Mantenimiento	0,15	3	2	3
Integración	0,10	1	5	3
Complejidad	0,10	1	1	3
Entorno rural	0,05	2	5	3
Total	1,00	2,95	3,35	3,00

De acuerdo con la matriz de decisión de la tabla 2.4, el empaquetado por Flow-Pack fue seleccionada como la alternativa más adecuada, principalmente por su operación continua, facilidad de integración y calidad uniforme del empaque final.

2.6.4 Sistema de sellado

Finalmente, para el sellado de los paquetes se consideraron las siguientes alternativas:

- **D1:** Sellado térmico convencional
- **D2:** Selladora de banda continua
- **D3:** Sellado al vacío

Tabla 2.5.*Matriz de decisión para el sistema de sellado*

Criterio	Peso	Térmico	Banda continua	Vacío
Control del proceso	0,25	3	5	4
Daño mecánico	0,20	4	4	5
Costo	0,15	4	4	2
Mantenimiento	0,15	4	4	3
Integración	0,10	3	5	3
Complejidad	0,10	3	4	2
Entorno rural	0,05	4	5	2
Total	1,00	3,55	4,40	3,35

Del análisis de la matriz mostrada en la Tabla 2.5 se determinó que la selladora de banda continua obtuvo el mayor puntaje ponderado. Esta alternativa fue seleccionada debido a su operación continua, facilidad de integración con el sistema de empaquetado y capacidad para generar sellos uniformes en los empaques.

2.6.5 Selección final de la solución

Con base en los resultados obtenidos en las matrices de decisión, se seleccionaron las siguientes alternativas para el diseño final del prototipo:

- Banda transportadora continua lisa para el transporte.
- Inspección por visión artificial basada en redes neuronales convolucionales.
- Clasificación automática mediante compuerta accionada por servomotor.

- Empaquetado por sistema Flow-Pack.
- Sellado mediante selladora de banda continua con control P de temperatura.

Estas decisiones permitieron consolidar una solución coherente, funcional y alineada con los objetivos del proyecto, sirviendo como base para el desarrollo del diseño conceptual y detallado presentado en las secciones siguientes.

2.7 Metodología de diseño del sistema automatizado

Una vez seleccionadas las alternativas óptimas mediante la matriz de decisión, se desarrolló metodología de diseño del sistema automatizado de inspección, clasificación, empaquetado y sellado de frutas. En esta etapa se definió los de forma progresiva los aspectos mecánicos, electrónicos y de software, desde la identificación del problema hasta la validación funcional del sistema.

2.7.1 Análisis del problema y definición de requerimientos

En esta etapa se analizó el proceso postcosecha de la fruta, seleccionándose el mango como producto de estudio, identificando las limitaciones asociadas a la inspección manual, la baja uniformidad del producto final y la reducción de la productividad. A partir de este análisis se establecieron los requerimientos de diseño del sistema, los cuales permitieron definir de manera clara las necesidades que debía cumplir la planta automatizada antes de proceder a las etapas de diseño.

2.7.1.1 Requerimientos del sistema

Los requerimientos del sistema se definieron considerando las condiciones de operación, el entorno agroindustrial y las restricciones económicas del proyecto. Entre los principales requerimientos establecidos se incluyen:

- Permitir el transporte continuo del mango a lo largo del proceso productivo.
- Realizar la inspección visual del producto sin contacto físico.
- Clasificar automáticamente los mangos según criterios de calidad.
- Integrarse con una etapa de empaquetado y sellado.
- Reducir la intervención manual en el proceso postcosecha.
- Utilizar una arquitectura de bajo costo y fácil mantenimiento.
- Operar de forma estable en un entorno agroindustrial.

2.7.2 Definición de la arquitectura del sistema

En base a los requerimientos definidos, se estableció la arquitectura general del sistema automatizado. Esta arquitectura se organizó de manera modular, considerando un sistema de transporte mediante banda transportadora, una estación de inspección visual basada en visión artificial, un mecanismo de clasificación mediante compuerta accionada y una etapa de empaquetado y sellado.

El sistema se estructuró en módulos funcionales que permiten una integración de los distintos subsistemas que conforman la planta:

1. **Módulo de transporte hacia la inspección**, basado en una banda transportadora continua lisa.
2. **Módulo de inspección por visión artificial**, implementado mediante una cámara y un modelo de inteligencia artificial basado en redes neuronales convolucionales.
3. **Módulo de clasificación automática**, compuesto por un servomotor encargado de desviar las frutas defectuosas.
4. **Módulo de empaquetado**, encargado del conteo automático de frutas aptas mediante un sensor infrarrojo y su agrupación dentro de una funda.
5. **Módulo de sellado**, basado en una selladora de banda continua.

2.7.3 Diseño mecánico del sistema

En esta fase se seleccionaron y definieron los elementos mecánicos y estructurales necesarios para el funcionamiento del sistema. Esto incluyó el diseño del módulo de transporte, el desarrollo del mecanismo de clasificación mediante compuerta desviadora accionada por servomotor, la estructura de soporte para el sistema de visión artificial y la integración mecánica del módulo de empaquetado y sellado.

2.7.3.1 Módulo de transporte

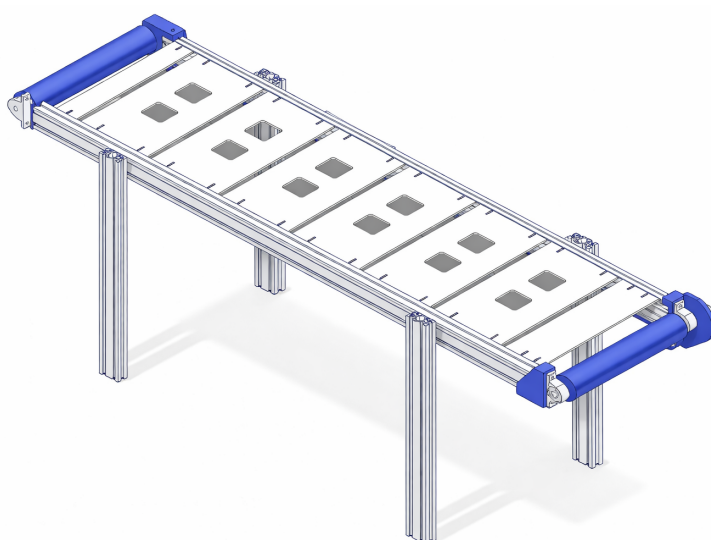
El módulo de transporte se diseñó para recibir los mangos provenientes del elevador existente y conducirlos de forma estable hacia la zona de inspección por visión artificial y clasificación. El sistema incorpora un rodillo motriz acoplado al motor y un rodillo libre para retorno y tensado de la banda, esto garantiza una trayectoria uniforme durante el

desplazamiento. Adicionalmente, se incluyeron guías laterales que reduce desplazamientos no deseados y evita la salida del producto durante la operación.

En la Figura 3 se presenta el ensamble CAD del módulo de transporte, el cual permitió validar el acoplamiento mecánico con la estructura general, el espacio disponible para el montaje del motor y la zona de operación asociada a la estación de inspección.

Figura 3

Diseño CAD del módulo de transporte



2.7.3.2 Análisis estructural del módulo de transporte

2.7.3.2.1 Modelo estructural considerado

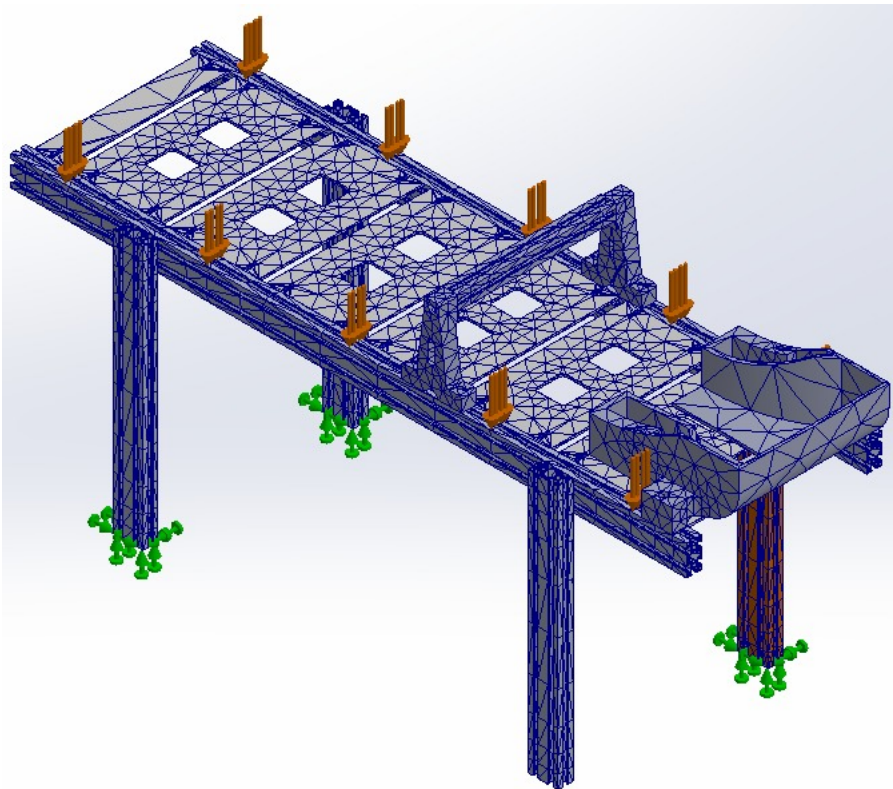
El análisis estructural del módulo de transporte se realizó sobre el ensamble completo de la banda transportadora, incluyendo la estructura principal de perfiles de aluminio, soportes verticales, superficies de apoyo y elementos auxiliares integrados al sistema. El modelo fue importado desde el diseño CAD y analizado mediante un estudio estático lineal, considerando el comportamiento elástico de los materiales y una distribución de cargas representativa de las

condiciones reales de operación.

La Figura 4 muestra el modelo discretizado mediante elementos finitos, donde se aprecia el mallado aplicado a la estructura, el cual permitió capturar adecuadamente la geometría y los puntos críticos del sistema.

Figura 4

Modelo mallado del módulo de transporte para el análisis por elementos finitos



2.7.3.2.2 Supuestos y condiciones de carga

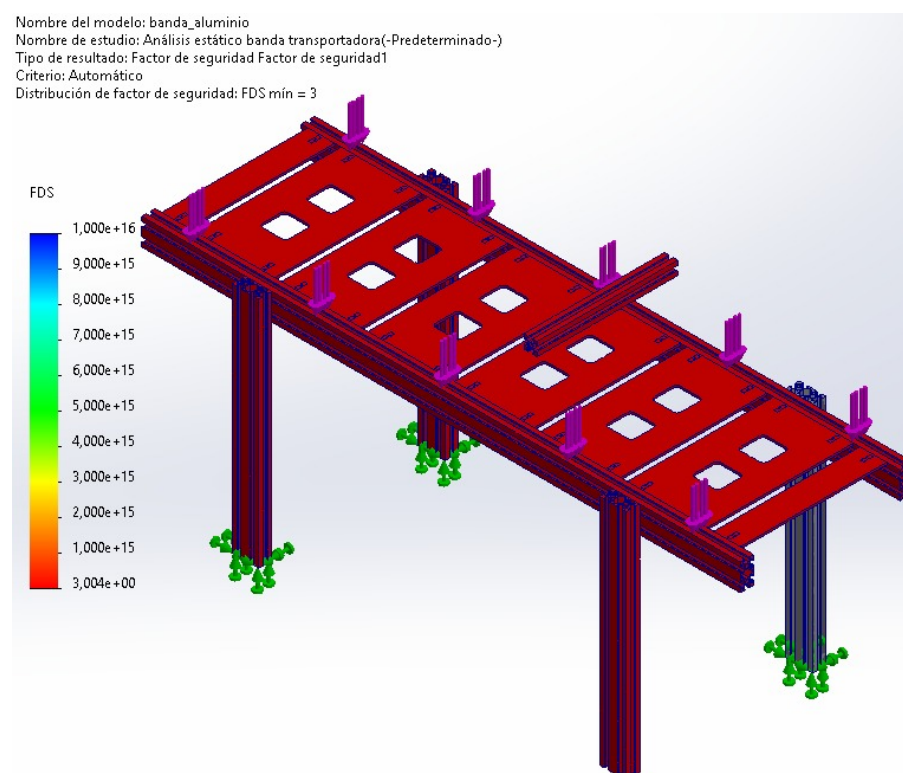
Para el análisis se asumió un comportamiento elástico lineal de los materiales y se despreciaron efectos dinámicos, vibraciones y cargas de impacto, dado que el sistema opera a baja velocidad. La carga aplicada corresponde al peso máximo estimado de los mangos transportados sobre la banda, distribuido de manera uniforme sobre la superficie superior del

módulo.

Las cargas verticales se aplicaron en los puntos de contacto entre la fruta y la banda transportadora, representadas mediante fuerzas concentradas equivalentes, como se observa en la Figura 5.

Figura 5

Aplicación de cargas verticales sobre el módulo de transporte



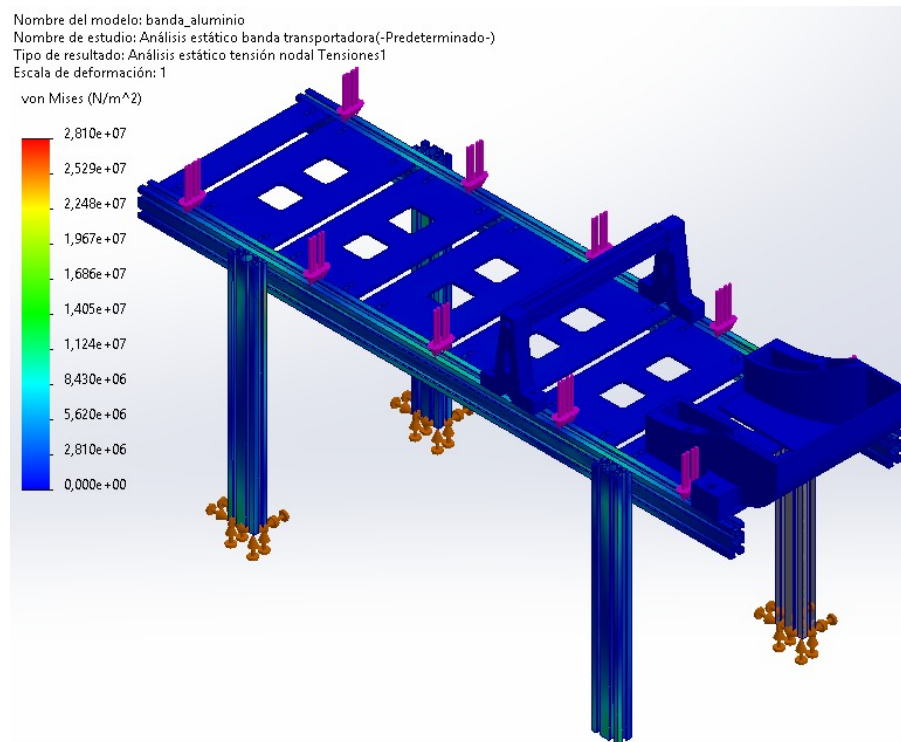
2.7.3.2.3 Restricciones y condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se definieron fijando completamente los apoyos inferiores de la estructura, correspondientes a las bases de los perfiles verticales anclados al suelo. Estas restricciones impiden desplazamientos y rotaciones en los tres ejes, simulando una instalación rígida del sistema sobre la superficie de trabajo. En la Figura 6 se muestran las zonas donde se

aplicaron las restricciones del modelo estructural.

Figura 6

Restricciones y condiciones de frontera del módulo de transporte

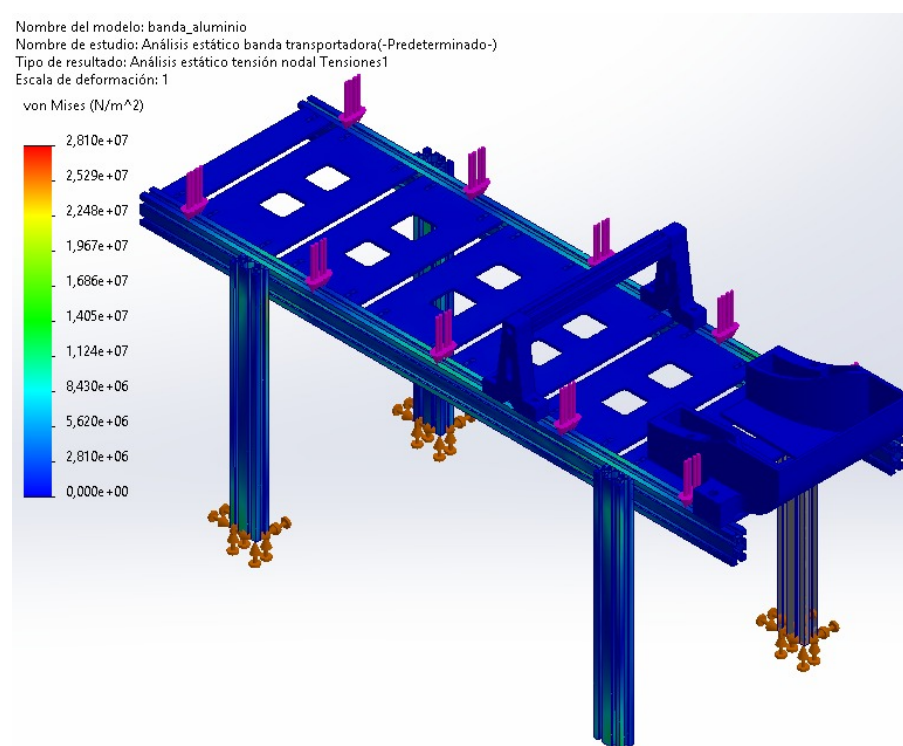


2.7.3.2.4 Resultados de esfuerzos y deformaciones

El análisis de tensiones equivalentes de von Mises mostró que los esfuerzos máximos se concentran principalmente en las zonas de unión entre los perfiles estructurales y los soportes verticales. Como se observa en la Figura 7, el valor máximo de tensión obtenido fue del orden de $2.81 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, el cual se encuentra por debajo del límite elástico del material estructural empleado, evidenciando que no existe riesgo de falla por fluencia bajo las condiciones de carga analizadas.

Figura 7

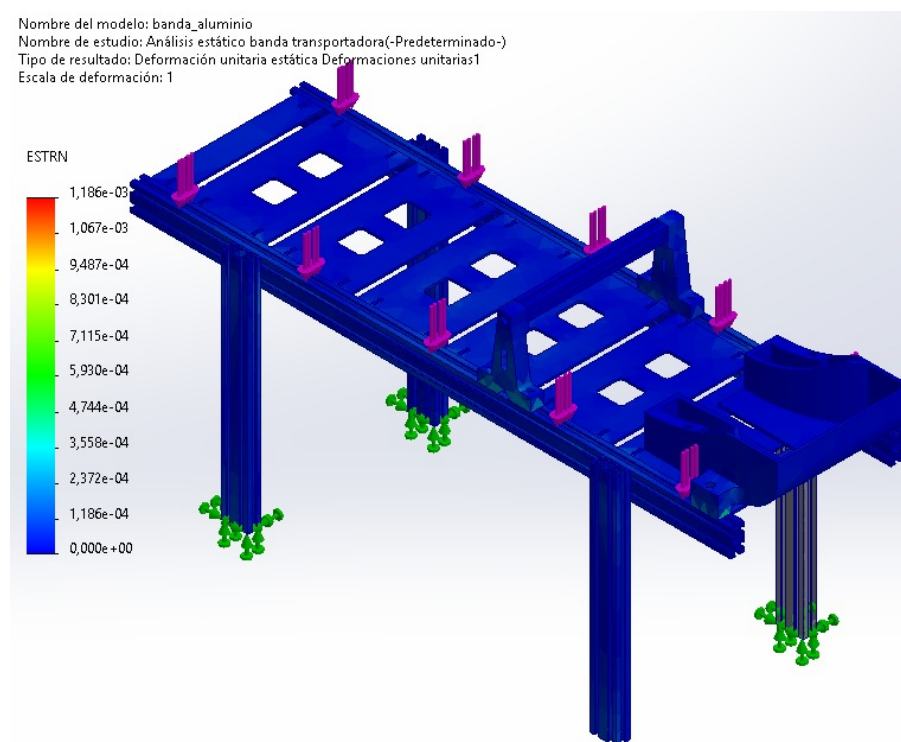
Distribución de tensiones equivalentes de von Mises en el módulo de transporte



La deformación unitaria máxima obtenida de acuerdo a la Figura 8 fue del orden de 1.19×10^{-3} , concentrándose en las zonas centrales de la estructura. Este valor indica un comportamiento elástico adecuado, sin presencia de deformaciones permanentes que puedan comprometer la estabilidad o el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 8

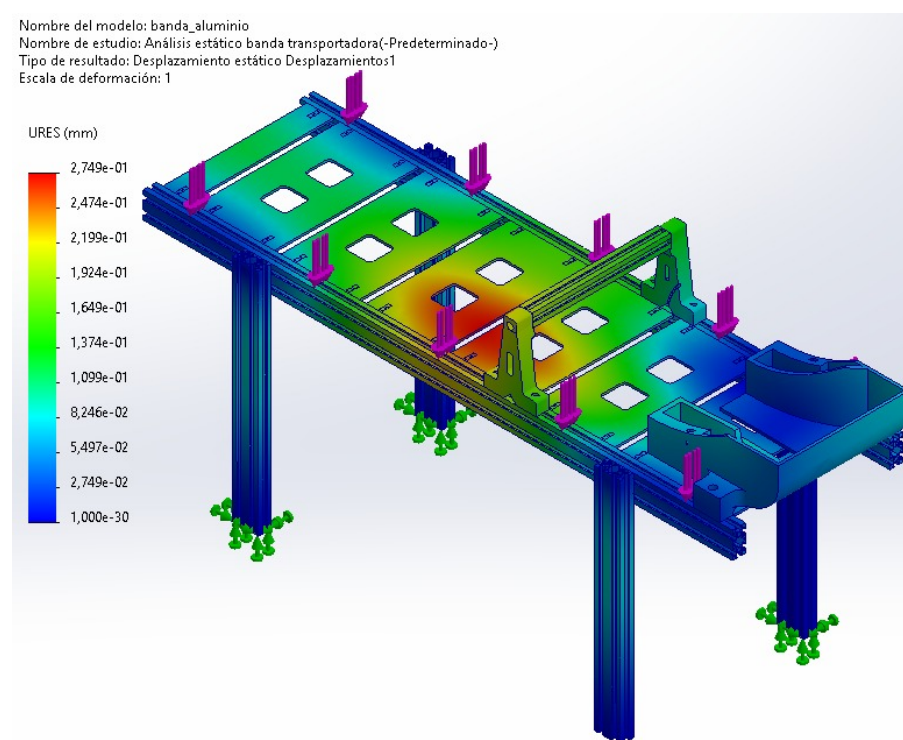
Distribución de deformación unitaria en el módulo de transporte



El desplazamiento total máximo registrado fue aproximadamente de 0.275 mm, localizado en la parte central de la banda transportadora. Como se observa en la Figura 9, este desplazamiento es reducido y no afecta la operación del sistema, garantizando que el transporte del producto se realice de manera estable y segura.

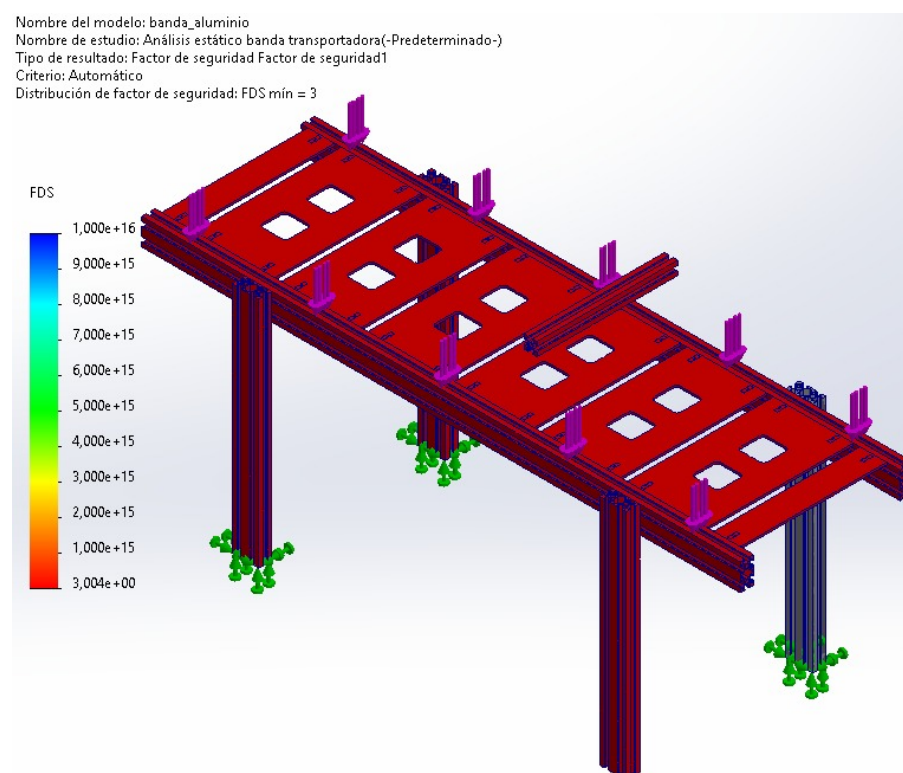
Figura 9

Desplazamiento total del módulo de transporte bajo carga



2.7.3.2.5 Evaluación del factor de seguridad

El análisis del factor de seguridad arrojó un valor mínimo aproximado de 3 en las zonas más exigidas estructuralmente. Como se observa en la Figura 10, este resultado confirma que el módulo de transporte cuenta con un margen de seguridad adecuado para soportar las cargas asociadas al paso de los mangos durante la operación normal del sistema.

Figura 10**Distribución del factor de seguridad del módulo de transporte****2.7.3.2.6 Conclusión del análisis estructural**

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el módulo de transporte presenta un comportamiento estructural seguro y estable. Los valores de tensión, deformación y desplazamiento se mantienen dentro de límites admisibles, y el factor de seguridad mínimo obtenido garantiza que la estructura puede operar sin riesgo de falla mecánica bajo las condiciones de carga evaluadas. En consecuencia, el diseño estructural es adecuado para la aplicación propuesta en el sistema automatizado de clasificación y empaquetado de mangos.

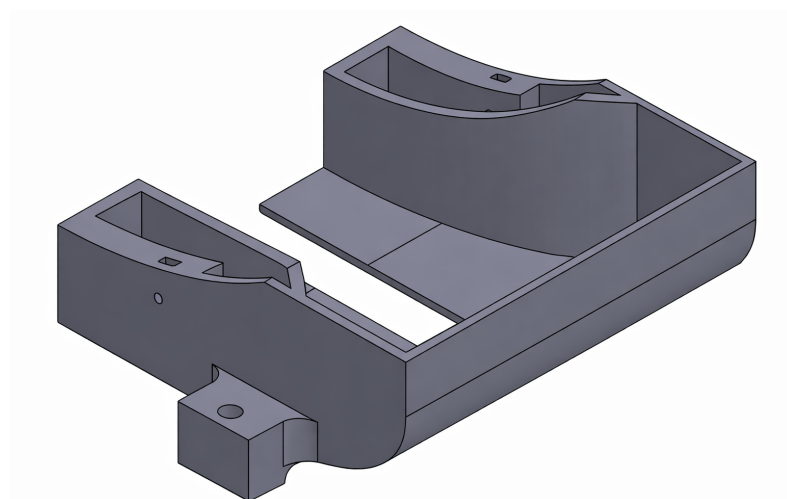
2.7.3.3 Canal de transferencia

Con el objetivo de garantizar una transición controlada y estable de los mangos desde el sistema de lavado hacia el módulo de transporte, se diseñó un canal de transferencia. Este elemento cumple la función de guiar el fruto de manera pasiva, aprovechando la gravedad y la geometría del canal orientándolo correctamente antes de su ingreso a la banda transportadora.

El canal fue diseñado considerando criterios de simplicidad constructiva, facilidad de ensamble y compatibilidad con la estructura existente del sistema de lavado. En la Figura 11 se presenta el modelo CAD del canal de transferencia.

Figura 11

Diseño CAD del canal de transferencia entre el sistema de lavado y el módulo de transporte



2.7.3.4 Soporte mecánico de la cámara de visión artificial

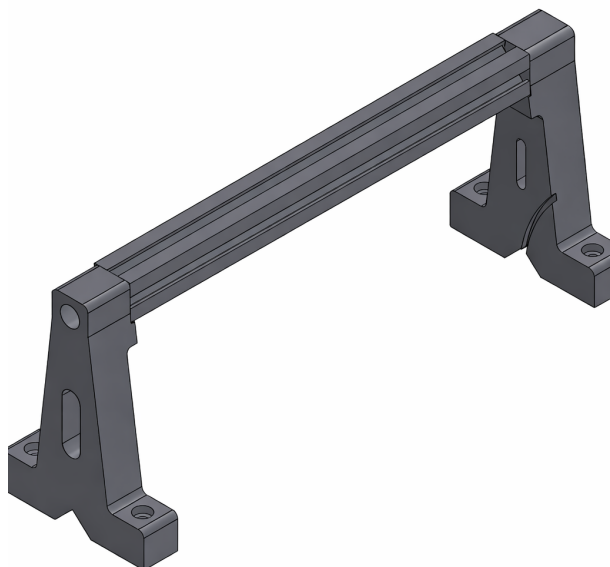
El soporte mecánico de la cámara de visión artificial fue diseñado para asegurar una posición estable y ajustable sobre el módulo de transporte. El soporte presenta una estructura tipo pórtico, conformada por dos apoyos laterales y un perfil horizontal superior, que permite

ubicar la cámara a una altura adecuada respecto a la banda transportadora. Los apoyos laterales cuentan con ranuras que facilitan el ajuste de la posición durante la instalación y la calibración del sistema.

El diseño se integra directamente con la estructura de la banda transportadora mediante fijaciones atornilladas, lo que proporciona rigidez y permite realizar ajustes o mantenimiento sin afectar el resto del sistema. En la Figura 12 se muestra el modelo CAD del soporte, donde se aprecia su geometría y disposición general.

Figura 12

Diseño CAD del soporte mecánico de la cámara de visión artificial



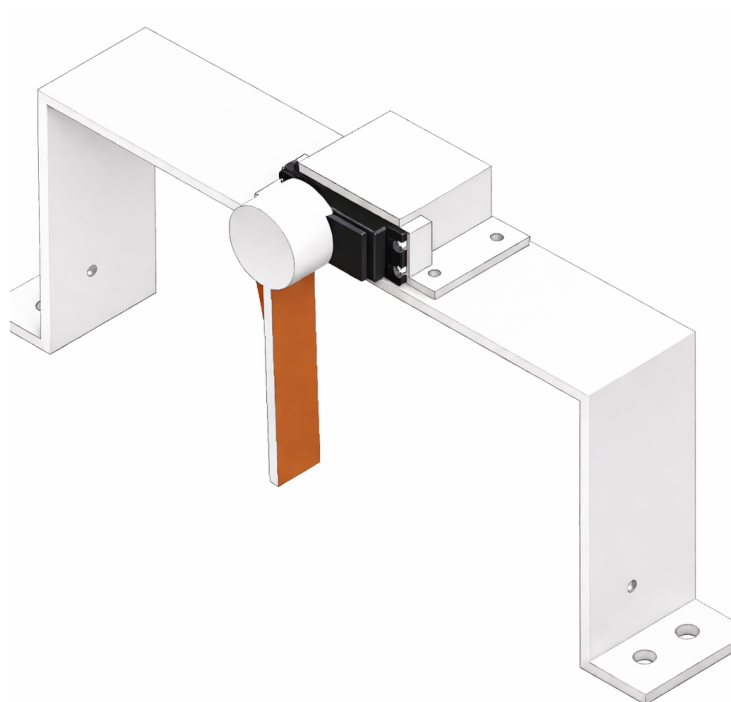
2.7.3.5 Módulo de clasificación

El módulo de clasificación fue diseñado para desviar los mangos hacia la salida correspondiente en función del resultado proporcionado por el sistema de visión artificial. El mecanismo se basa en una compuerta desviadora de tipo paleta, accionada mediante un servomotor, ubicada inmediatamente después de la zona de inspección.

El servomotor se encuentra montado lateralmente sobre una estructura de soporte rígida, permitiendo transmitir el movimiento de forma directa al eje de la compuerta. La paleta desviadora adopta una posición vertical que intercepta parcialmente la trayectoria del mango, redirigiéndolo hacia el canal de salida asignado. Mediante el control del ángulo de giro del servomotor, la compuerta puede posicionarse en los estados requeridos para permitir el paso recto del fruto o su respectivo desvío. En la Figura 13 se presenta el modelo CAD del módulo de clasificación, donde se aprecia la disposición del servomotor, la compuerta desviadora y los elementos de soporte.

Figura 13

Diseño CAD del módulo de clasificación mediante compuerta desviadora accionada por servomotor



2.7.3.6 Módulo de sellado

El módulo de sellado fue diseñado para realizar el cierre del empaque de manera continua y controlada, una vez finalizado el proceso de inspección y clasificación del producto. Para este propósito, se desarrolló una selladora de banda continua de configuración vertical, adecuada para aplicaciones de bajo costo y coherente con el enfoque de prototipo funcional del sistema.

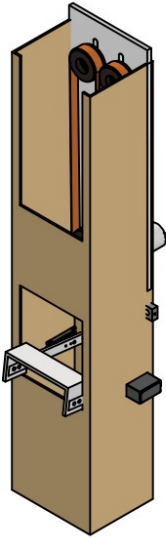
El diseño mecánico del módulo se basa en una estructura tipo columna fabricada en MDF, la cual proporciona soporte a los diferentes subsistemas involucrados en el proceso de sellado. Esta estructura alberga el sistema de arrastre del material de empaque, conformado por un conjunto de rodillos y correas, así como la zona de sellado térmico, donde se aplica presión y temperatura para el cierre del paquete.

La configuración vertical del módulo permite un flujo continuo del material de empaque, facilitando su guiado a lo largo del recorrido y favoreciendo la evacuación del paquete sellado por efecto de la gravedad. Adicionalmente, el diseño incorpora guías y elementos de soporte que aseguran la alineación del empaque durante el proceso, reduciendo desviaciones y fallos en el sellado.

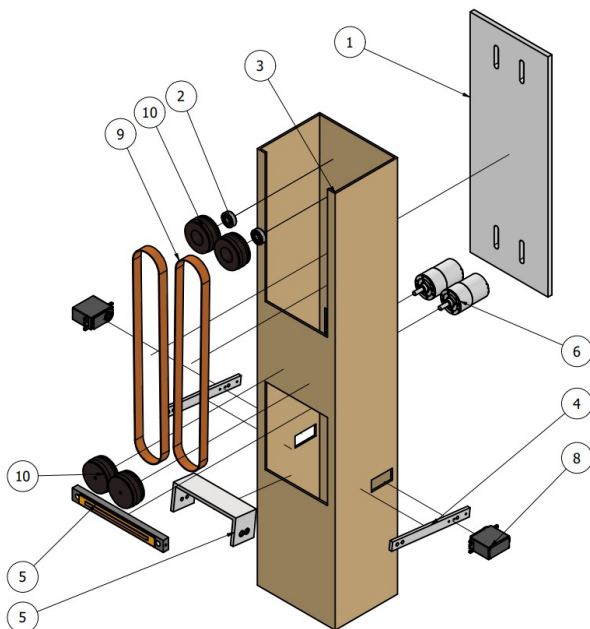
En la Figura 14 se muestra el ensamble CAD del módulo de sellado, donde se aprecia la disposición general de la estructura, el recorrido del material de empaque y la integración de los elementos mecánicos principales. Por su parte, la Figura 15 presenta la vista explotada del módulo, permitiendo identificar los componentes que conforman el sistema de arrastre, las guías, los rodillos y los elementos asociados al proceso de sellado.

Figura 14

Diseño CAD del ensamble del módulo de sellado mediante selladora de banda continua vertical

**Figura 15**

Vista explotada del módulo de sellado y sus componentes principales



2.7.4 Diseño electrónico y de control

Desde el inicio, se priorizó una arquitectura electrónica que permitiera integrar los distintos subsistemas del prototipo —transporte, inspección, clasificación, empaquetado y sellado— manteniendo simplicidad, confiabilidad y facilidad de implementación.

2.7.4.1 Enfoque del diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema se desarrolló bajo un enfoque práctico y funcional, alineado con los objetivos generales del proyecto y con las condiciones reales de aplicación.

Uno de los principales criterios adoptados fue el bajo costo, considerando que el sistema está orientado a PYMEs agrícolas y entornos rurales donde el acceso a tecnologías industriales de alto precio resulta limitado. Por esta razón, se seleccionaron componentes electrónicos comerciales ampliamente disponibles en el mercado local, como motores CC, servomotores, sensores infrarrojos y microcontroladores, evitando el uso de controladores industriales que incrementen el costo total del prototipo.

Otro aspecto fundamental del enfoque de diseño fue la separación entre los circuitos de potencia y de control. Los elementos encargados del accionamiento de motores, resistencias térmicas y actuadores de mayor consumo fueron alimentados mediante fuentes externas de mayor capacidad, mientras que los circuitos de control, sensado y comunicación operan a niveles de bajo voltaje.

Finalmente, la elección de una arquitectura sencilla, basada en lógica secuencial y control discreto, permite que el sistema pueda ser operado y diagnosticado por personal con conocimientos técnicos básicos favoreciendo su replicabilidad y adaptación a diferentes

contextos productivos.

2.7.4.2 Arquitectura electrónica del sistema

Para la arquitectura electrónica se adoptó una arquitectura distribuida, en la cual las tareas de procesamiento intensivo y las tareas de control de bajo nivel se encuentran diferenciadas. El sistema se compone de dos niveles principales de control. En el primer nivel se encuentra la unidad de procesamiento encargada de la visión artificial, responsable de adquirir y analizar las imágenes del producto. En el segundo nivel se ubica la unidad de control embebida, encargada de la lectura de sensores, la ejecución de la lógica de control y el accionamiento de los elementos electromecánicos del sistema.

Se diseñó de tal forma que sea modular, es decir que cada subsistema electrónico cumpla una función específica dentro del proceso general. En la Figura X se presentará el diagrama de bloques de la arquitectura electrónica del sistema, donde se muestran las principales unidades de control, los sensores, los actuadores, el sistema de alimentación y los enlaces de comunicación entre los distintos módulos.

2.7.4.2.1 Unidades de control

Se estableció dos unidades de control para distribuir la carga de procesamiento y garantizar una operación eficiente del prototipo.

La computadora personal actúa como la unidad de procesamiento de alto nivel del sistema. En ella se ejecuta el modelo de visión artificial entrenado para la inspección y clasificación del producto, así como los algoritmos de procesamiento de imágenes en tiempo real. La PC recibe las imágenes capturadas por la cámara, procesa la información visual y

determina el estado del producto según los criterios establecidos. Una vez tomada la decisión, la PC envía la señal correspondiente hacia la unidad de control embebida para que se ejecute la acción física requerida.

Por otro lado, la ESP32 funciona como la unidad de control central del sistema electromecánico. Este microcontrolador se encarga de la lectura de sensores, el control de motores y servomotores, la activación del sistema de sellado y la ejecución de la secuencia lógica del proceso. La ESP32 fue seleccionada por su bajo costo, disponibilidad local, capacidad de procesamiento y su facilidad de integración con múltiples dispositivos.

2.7.4.2.2 Sensores del sistema

Los sensores del sistema cumplen la función de detectar la presencia, posición y cantidad de productos a lo largo de las distintas etapas del proceso automatizado. En el prototipo desarrollado se emplearon sensores infrarrojos (IR) de tipo obstáculos, seleccionados por su bajo costo, facilidad de integración y confiabilidad para aplicaciones de conteo y detección de paso de objetos.

Sensores en el sistema de transporte y clasificación. En el sistema de transporte se instaló un sensor infrarrojo en cada carril de salida del canal para detectar el paso del mango al ingresar al sistema de transporte. La señal generada por estos sensores es enviada a la ESP32, la cual utiliza esta información para habilitar la apertura de las compuertas de entrada mediante servomotores.

En la etapa posterior a la inspección, se incorporaron sensores infrarrojos en cada carril. Estos sensores identifican el carril por el cual avanza el producto luego de la inspección. La información de detección es utilizada por la ESP32 en conjunto con la decisión enviada desde

la PC para accionar el mecanismo de desvío.

Sensor en el sistema de empaquetado y sellado. En la etapa de empaquetado y sellado se implementó un único sensor infrarrojo ubicado a la salida de la banda transportadora. Este sensor tiene como función principal realizar el conteo de los mangos clasificados como aptos que ingresan al sistema de sellado. Cuando se alcance un conteo de cuatro mangos, se ejecuta automáticamente la secuencia de sellado.

Consideraciones generales de sensado. Todos los sensores infrarrojos del sistema están conectados a entradas digitales de la ESP32 para una lectura rápida y confiable de los eventos de detección.

La Tabla 2.6 resume los sensores utilizados en el sistema automatizado, indicando el modelo, la cantidad empleada y la etapa del proceso en la que fueron instalados.

Tabla 2.6.

Sensores empleados en el sistema automatizado

Ítem	Sensor utilizado	Modelo	Cantidad	Etapa del sistema
1	Sensor infrarrojo de obstáculos	HW-201	2	Salida del canal de alimentación
2	Sensor infrarrojo de obstáculos	HW-201	2	Post-inspección (clasificación)
3	Sensor infrarrojo de obstáculos	HW-201	1	Entrada al sistema de sellado
Total de sensores infrarrojos utilizados: 5 unidades				

2.7.4.2.3 Actuadores del sistema

Para el prototipo se emplearan motores de corriente continua y servomotores, seleccionados por su facilidad de control, bajo costo y adecuada respuesta para aplicaciones de automatización de pequeña escala.

Actuadores en el sistema de transporte y clasificación. En la etapa inicial del sistema de transporte, a la salida del canal de alimentación, se instalaron dos servomotores que actúan como compuertas de entrada hacia los carriles de la banda transportadora.

En la etapa de clasificación se incorporó un servomotor principal para accionar el mecanismo de desvío de los mangos defectuosos. Este servomotor se activa cuando la ESP32 recibe la señal del sensor infrarrojo correspondiente y la decisión de clasificación enviada desde la computadora, permitiendo expulsar los mangos no aptos y que los mangos aptos continúen hacia la etapa de empaquetado.

El movimiento del sistema de transporte es generado por un motor de corriente continua acoplado a la banda transportadora, el cual proporciona una velocidad constante para el desplazamiento del producto.

Actuadores en el sistema de empaquetado y sellado. En la etapa de empaquetado y sellado se utilizaron dos motores de corriente continua para accionar las bandas de teflón de la selladora, encargadas del arrastre del material plástico a través de las mordazas. Estos motores son controlados por la ESP32 mediante un controlador TB6612FNG, que permite el encendido, apagado y la inversión de giro.

El sistema de sellado incorpora además dos servomotores que accionan las mordazas de cierre del empaque. Estos se activan automáticamente cuando el sistema de conteo detecta el ingreso de cuatro mangos al área de sellado.

El sellado térmico se realiza mediante resistencias eléctricas que generan el calor necesario para fusionar el material plástico. Dichas resistencias son alimentadas por fuentes externas y operan de forma independiente al sistema de control electrónico.

Consideraciones generales de actuación. Todos los actuadores controlados

electrónicamente se encuentran conectados a las salidas digitales y de control de la ESP32, permitiendo una respuesta rápida y confiable ante los eventos detectados por los sensores.

La Tabla 2.7 presenta los actuadores utilizados en el sistema, especificando su tipo, modelo y la etapa del proceso en la que intervienen.

Tabla 2.7.

Actuadores empleados en el sistema automatizado

Ítem	Actuador utilizado	Modelo / Tipo	Cantidad	Etapa del sistema
1	Servomotor	SG90	2	Canal de alimentación / transporte
2	Servomotor	MG996	1	Clasificación post-inspección
3	Motor DC	DC 12 V	1	Transporte
4	Motor DC	DC 12 V	2	Sellado (bandas de teflón)
5	Servomotor	MG996	2	Sellado (mordazas)
Total de actuadores controlados: 8 unidades				

2.7.4.2.4 Sistema de alimentación eléctrica

El sistema de alimentación eléctrica se estructuró a partir de fuentes externas independientes, con el objetivo de suministrar de manera adecuada los distintos niveles de tensión requeridos por los subsistemas de control y potencia. En la Tabla 2.8 se resumen las fuentes de alimentación empleadas y los componentes asociados a cada nivel de tensión.

Tabla 2.8.*Fuentes de alimentación empleadas en el sistema automatizado*

Ítem	Voltaje de salida	Tipo de fuente	Elementos alimentados
1	5 VDC	Fuente externa	ESP32 - Servomotores MG996
2	5 VDC	Alimentación desde ESP32	Servomotores SG90
3	12 VDC	Fuente externa	Motores reductores del sistema
4	12 VDC	Fuente externa	Resistencias térmicas de sellado

A continuación, se presentan los diagramas del diseño eléctrico del sistema, los cuales permiten visualizar la interconexión de los componentes electrónicos, así como la disposición física de los elementos en la placa de circuito impreso.

Las Figuras 16, 17 y 18 muestran respectivamente el esquema eléctrico general del sistema, el diseño del ruteo de la placa de circuito impreso y la representación tridimensional del PCB con la disposición física de los componentes electrónicos.

Figura 16

Esquema eléctrico general del sistema

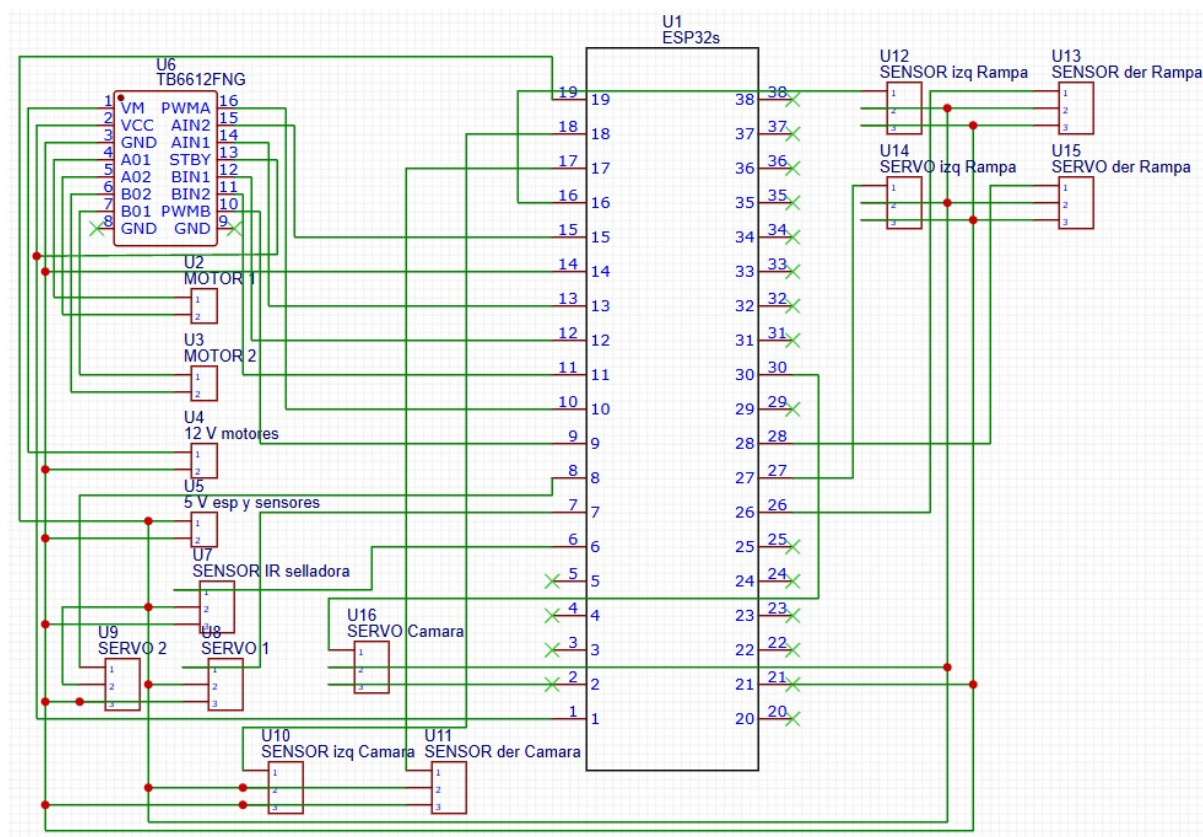


Figura 17

Diseño de la placa Ruteo y organización

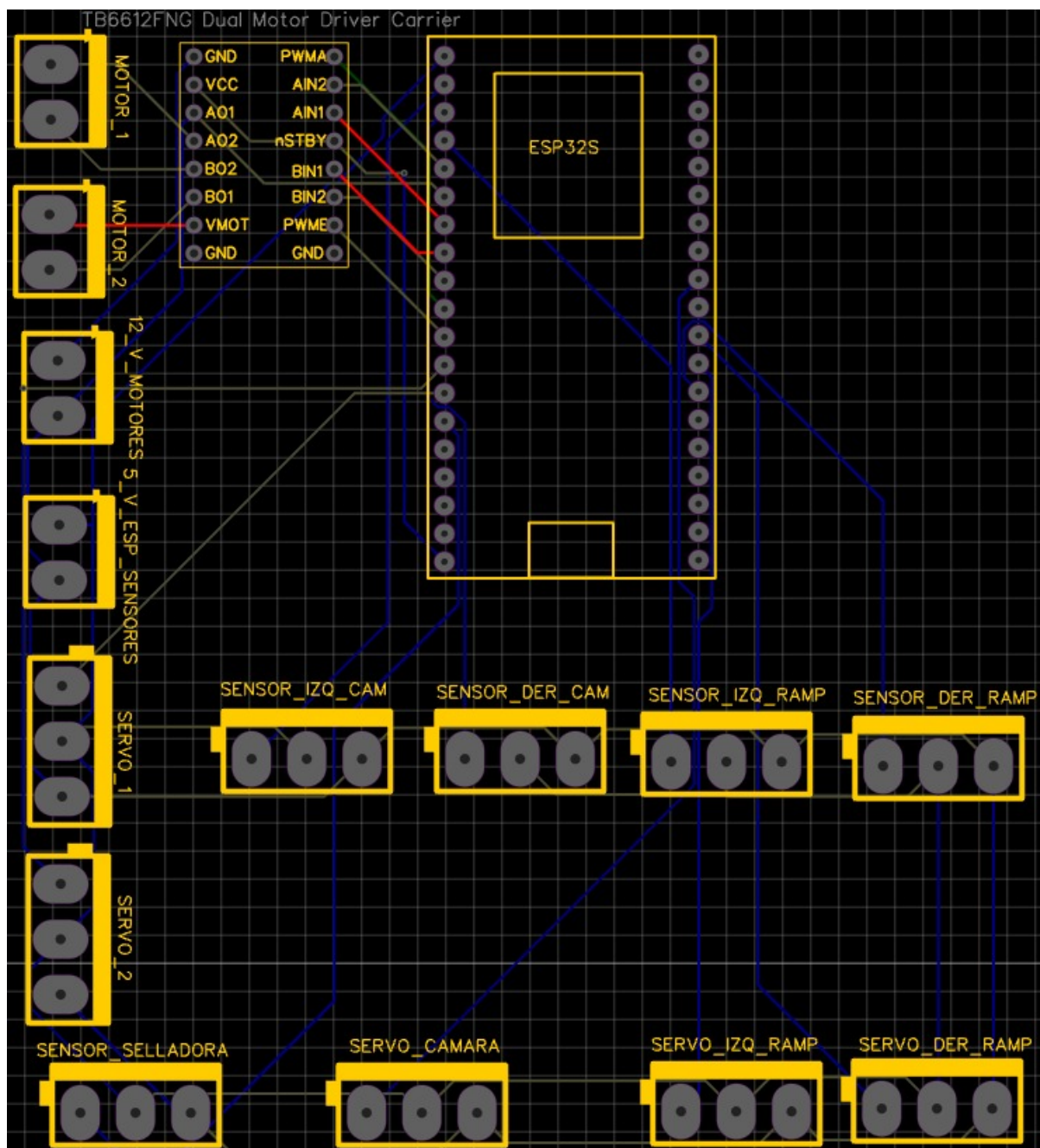
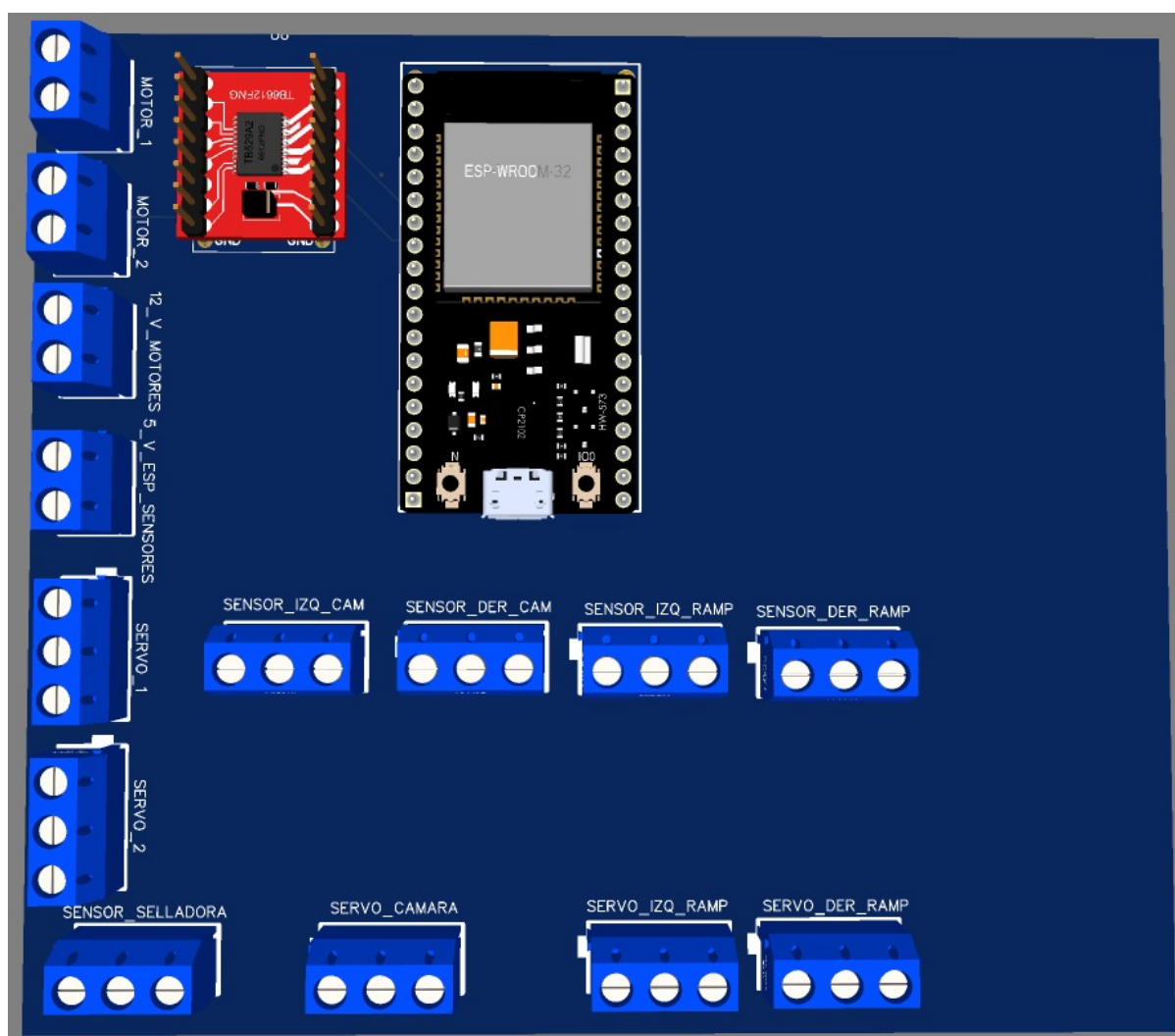


Figura 18

PCB 3D Disposición física de componentes



2.7.4.3 Diseño del sistema de control

La lógica de control del sistema sigue una secuencia de eventos que inicia con la detección del producto mediante sensores infrarrojos. Una vez detectado el paso del mango, la ESP32 habilita el ingreso al sistema de transporte y mantiene el movimiento continuo de la banda transportadora.

Durante la inspección, la cámara captura las imágenes del producto y la computadora ejecuta el modelo de visión artificial. El resultado de la clasificación es enviado a la ESP32, la cual, en conjunto con la información de los sensores de posición, decide si se activa o no el mecanismo de desvío. Posteriormente, los mangos clasificados como aptos continúan hacia la etapa de empaquetado, donde el sistema de conteo habilita el sellado al alcanzarse el número programado de unidades por paquete.

2.7.4.3.1 Sincronización entre visión artificial y actuadores

La sincronización entre el sistema de visión artificial y los actuadores se logra mediante la combinación del control de velocidad de la banda transportadora y la detección precisa de la posición del producto a través de sensores infrarrojos. La velocidad de avance fue seleccionada para que cada mango permanezca el tiempo suficiente dentro del campo de visión de la cámara. Una vez emitida la decisión de clasificación desde la computadora, la ESP32 utiliza la información de los sensores ubicados después de la inspección para accionar el servomotor correspondiente en el momento adecuado. Con esto se garantiza confiabilidad entre la decisión de clasificación y la acción física ejecutada.

2.7.4.4 Justificación de la arquitectura electrónica seleccionada

La arquitectura electrónica seleccionada, basada en la combinación de una computadora personal y un microcontrolador ESP32, responde a criterios de funcionalidad, costo y accesibilidad, especialmente orientados a pequeños productores. En este contexto, el uso de una computadora personal resulta una alternativa viable, ya que en la mayoría de los casos este tipo de usuarios ya dispone de una PC para tareas administrativas o de gestión, lo

que permite aprovechar recursos existentes sin incrementar el costo total del sistema.

La computadora personal se encarga de la ejecución del modelo de visión artificial, evitando la necesidad de adquirir hardware embebido especializado o controladores industriales de alto costo para procesamiento de imágenes. Por su parte, la ESP32 asume las tareas de control, sensado y accionamiento en tiempo real, garantizando una respuesta adecuada del sistema ante los eventos detectados.

Esta distribución de funciones permite desarrollar una solución de bajo costo, accesible y fácilmente replicable, alineada con el enfoque de “trabajar con lo que ya se tiene”. Además, la arquitectura adoptada facilita futuras ampliaciones del sistema, como la incorporación de nuevos sensores, mejoras en el modelo de clasificación o la implementación de estrategias de control más avanzadas, sin requerir modificaciones sustanciales en la estructura electrónica existente.

2.7.5 Diseño del software y validación

El diseño del software del sistema fue a través de un modelo de visión artificial capaz de inspeccionar y clasificar mangos en tiempo real, así como a su integración con el sistema de control electrónico.

2.7.5.1 Diseño del modelo de visión artificial

El modelo de visión artificial se desarrolló utilizando redes neuronales convolucionales basadas en el modelo YOLOv11, seleccionado por su capacidad de detección en tiempo real y su adecuado balance entre precisión y costo computacional. Se empleó la técnica de *transfer learning*, aprovechando un modelo previamente entrenado sobre el conjunto de datos COCO, lo que permitió reducir el tiempo de entrenamiento y mejorar el desempeño del modelo con un

conjunto de datos limitado.

El modelo seleccionado como base corresponde a la versión *YOLOv11 Small* (*YOLOv11s*), debido a que ofrece un compromiso adecuado entre complejidad, velocidad de inferencia y capacidad de generalización, siendo apropiado para su ejecución en una computadora personal conectada al sistema automatizado.

2.7.5.2 Preparación y segmentación del dataset

La preparación del conjunto de datos se realizó utilizando la plataforma Roboflow, la cual permitió gestionar, anotar y organizar las imágenes empleadas para el entrenamiento del modelo de visión artificial. Para la construcción del dataset se capturaron imágenes de mangos en diferentes condiciones de iluminación, orientación y posición sobre la banda transportadora, buscando representar escenarios similares a los que se presentan durante la operación real del sistema.

El proceso de segmentación y etiquetado se llevó a cabo de manera manual, utilizando cuadros delimitadores (*bounding boxes*) para identificar la región de interés correspondiente a cada mango presente en las imágenes. Durante esta etapa, las muestras fueron clasificadas en dos categorías principales: mangos buenos y mangos malos, de acuerdo con las características visuales observables, tales como color, forma y presencia de defectos superficiales.

La Figura 19 y la Figura 20 muestran ejemplos del proceso de etiquetado realizado en Roboflow para ambas clases. Una vez finalizado el proceso de etiquetado, el dataset fue dividido en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba, utilizando una proporción del 70%, 20% y 10%, respectivamente. Como parte del preprocesamiento, todas las imágenes fueron redimensionadas a un tamaño de 640×640 píxeles, acorde a los requerimientos de

entrada del modelo YOLOv11. Finalmente, el conjunto de datos fue exportado en formato compatible con Ultralytics, generándose el archivo de configuración `data.yaml`, que define las rutas de los subconjuntos y las clases empleadas durante el entrenamiento.

Figura 19

Ejemplo del proceso de etiquetado de mangos aptos en Roboflow

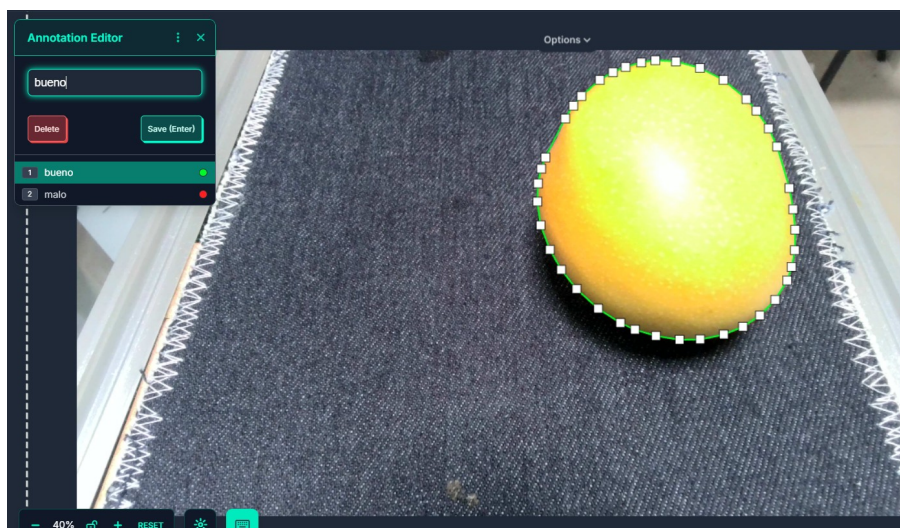
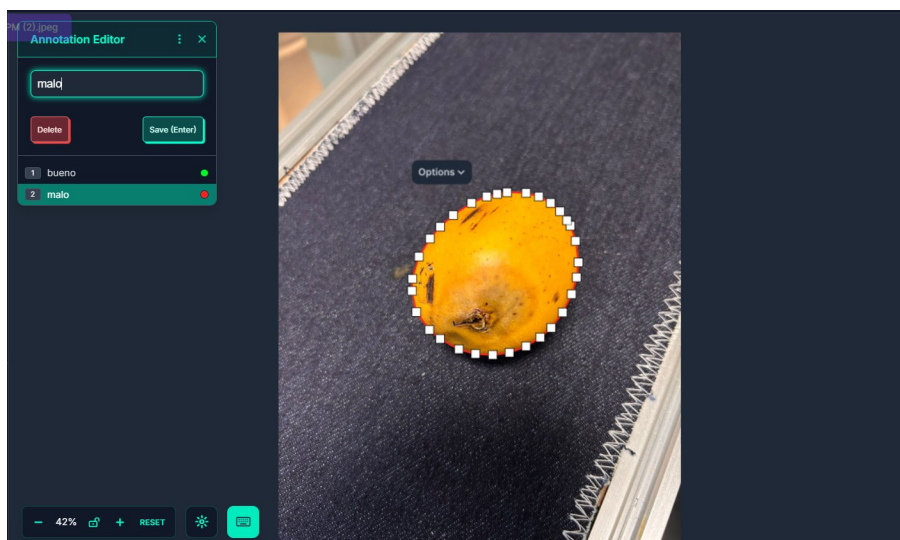


Figura 20

Ejemplo del proceso de etiquetado de mangos no aptos en Roboflow



2.7.5.3 Entrenamiento del modelo de clasificación

El entrenamiento del modelo se llevó a cabo en la plataforma Google Colab, aprovechando la aceleración por GPU para reducir el tiempo de cómputo. Se utilizaron las librerías Roboflow y Ultralytics, las cuales permiten una integración directa entre el dataset y el modelo de detección seleccionado.

Durante el proceso de entrenamiento se configuraron los parámetros principales del modelo, incluyendo el número de épocas y el tamaño de las imágenes de entrada. El modelo fue entrenado durante 30 épocas, generándose como resultado un conjunto de pesos optimizados, entre los cuales se seleccionó el archivo `best.pt`, correspondiente al modelo con mejor desempeño durante el entrenamiento.

2.7.5.4 Integración del modelo al sistema

Una vez entrenado, el modelo de visión artificial fue integrado al sistema de software de la computadora personal para realizar inferencias en tiempo real a partir de la señal de video capturada por la cámara.

Como resultado de la inferencia, el sistema genera una decisión que indica tanto la calidad del fruto (bueno o malo) como la dirección de desvío correspondiente (izquierda o derecha). Estas decisiones son visualizadas inicialmente en la consola del sistema como mecanismo de verificación y validación del funcionamiento del modelo durante la ejecución en tiempo real.

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de la salida generada por el sistema, donde se observa la secuencia de clasificaciones emitidas por el modelo, evidenciando la identificación

del estado del mango y la acción asociada para su clasificación.

Figura 21

Salida del sistema de clasificación en tiempo real generada por el modelo de visión artificial

```

ntrar el archivo especificado.", None, 2)
o (venv) PS C:\Users\Floresco\Desktop\CristhianFlores\TrainingModel> c:; cd 'c:\Users\Floresco\Desktop\CristhianFlores\TrainingModel'; & 'c:\Users\Floresco\Desktop\CristhianFlores\TrainingModel\venv\Scripts\python.exe' 'c:\Users\Floresco\cursor\extensions\ms-python.debugpy-2025.18.0-win32-x64\bundled\libs\debugpy\launcher' '62084' '--' 'c:\Users\Floresco\Desktop\CristhianFlores\TrainingModel\main.py'
BUENO|IZQUIERDA
MALO|IZQUIERDA
BUENO|DERECHA
BUENO|DERECHA
MALO|IZQUIERDA

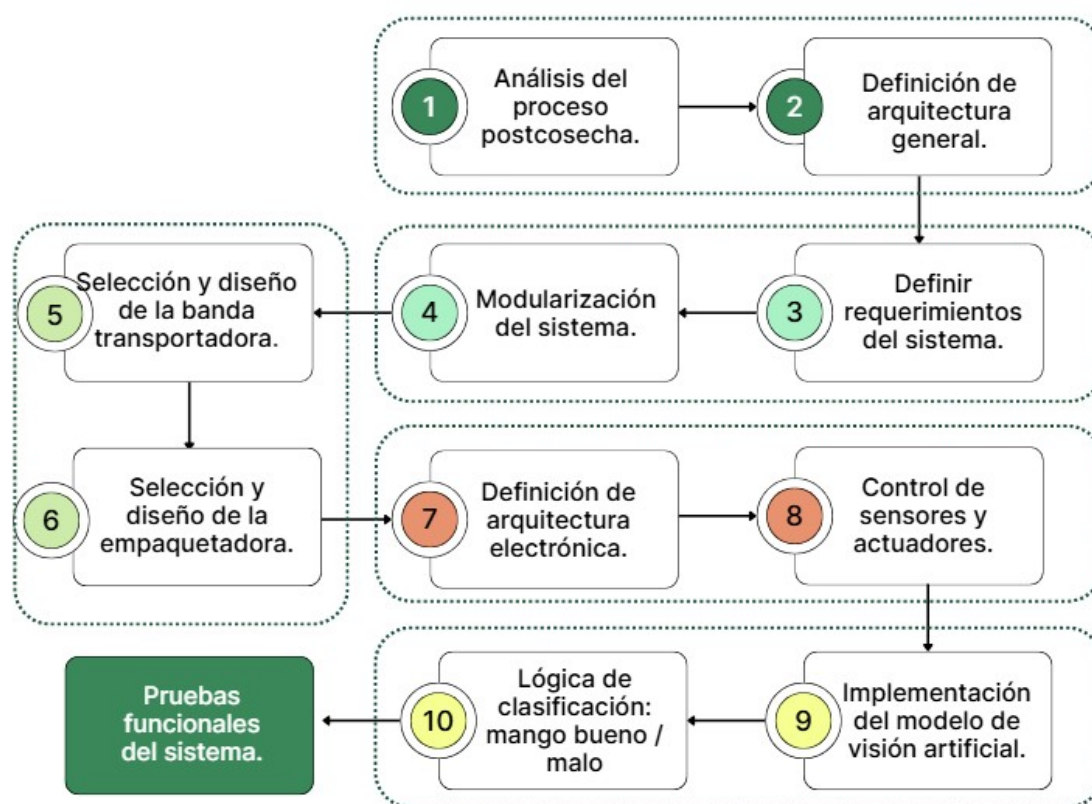
```

2.7.5.5 Validación funcional del software

La validación del software se realizó mediante pruebas funcionales del sistema completo, verificando la correcta ejecución del flujo de inspección, clasificación y comunicación con la unidad de control. Estas pruebas permitieron comprobar que el modelo de visión artificial se ejecuta correctamente, que las decisiones de clasificación son transmitidas a la ESP32 y que el sistema responde de manera adecuada a dichas decisiones durante la operación del prototipo. La metodología general seguida para el desarrollo e integración del sistema se presenta en la Figura 22.

Figura 22

Metodología de diseño del sistema automatizado



2.7.6 Cálculos del sistema

Se realizaron los cálculos relacionados con la capacidad de transporte, la velocidad de la banda, su validación experimental y la adecuación del sistema a los requerimientos de visión artificial y sellado.

2.7.6.1 Dimensionamiento del motor de la banda transportadora

El dimensionamiento del motor de la banda transportadora se realizó considerando las condiciones reales de operación del sistema, en el cual el transporte del producto se efectúa sobre

una banda horizontal. En este caso, el motor únicamente debe vencer las fuerzas de fricción presentes entre la banda, los tambores y la carga transportada.

Las condiciones de operación consideradas fueron las siguientes:

- Masa máxima transportada: $m = 6 \text{ kg}$
- Velocidad lineal real de la banda: $v = 0.035 \text{ m/s}$
- Coeficiente de fricción global: $\mu = 0.03$
- Longitud efectiva de transporte: $L = 1.07 \text{ m}$

El peso de la carga transportada se calculó como se muestra en la Ecuación 2.1:

$$P = mg = 6.0 \cdot 9.81 = 58.86 \text{ N} \quad (2.1)$$

Dado que la banda es horizontal, la fuerza normal es igual al peso de la carga, como se expresa en la Ecuación 2.2:

$$N = P = 58.86 \text{ N} \quad (2.2)$$

La fuerza de fricción que debe vencer el motor se determinó como se muestra en la Ecuación 2.3:

$$F_r = \mu N = 0.03 \cdot 58.86 = 1.77 \text{ N} \quad (2.3)$$

El trabajo mecánico requerido para trasladar la carga a lo largo de la banda se calculó mediante la Ecuación 2.4:

$$W = F_r \cdot L = 1.77 \cdot 1.07 = 1.89 \text{ J} \quad (2.4)$$

El tiempo necesario para recorrer la longitud de la banda, considerando la velocidad real de operación, fue determinado mediante la Ecuación 2.5:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{1.07}{0.035} \approx 30.6 \text{ s} \quad (2.5)$$

La potencia mecánica requerida se obtuvo como se muestra en la Ecuación 2.6:

$$P_m = \frac{W}{t} = \frac{1.89}{30.6} \approx 0.062 \text{ W} \quad (2.6)$$

Finalmente, considerando una eficiencia global del sistema del 80%, la potencia real demandada al motor se estimó como se indica en la Ecuación 2.7:

$$P_{real} = \frac{P_m}{0.8} \approx 0.078 \text{ W} \quad (2.7)$$

2.7.6.2 Cálculo de la velocidad de la banda transportadora

La velocidad de la banda transportadora se determinó a partir de un análisis teórico y una medición experimental, con el fin de validar el comportamiento real del sistema de transporte. El sistema está accionado por un motor DC modelo 25GA370, cuya velocidad a la salida del reductor es de 36 rpm, acoplado a un sistema de transmisión por engranajes.

El piñón acoplado al motor presenta un diámetro de 34 mm, mientras que el engranaje acoplado al tambor motriz presenta un diámetro de 56.5 mm. A partir de estos valores, se obtuvo la relación de transmisión mostrada en la Ecuación 2.8:

$$i = \frac{D_p}{D_g} = \frac{34}{56.5} = 0.602 \quad (2.8)$$

La velocidad de rotación del tambor motriz se calculó mediante la Ecuación 2.9:

$$N_{tambor} = N_{motor} \cdot i = 36 \cdot 0.602 = 21.7 \text{ rpm} \quad (2.9)$$

La longitud total de la banda se estimó considerando la distancia entre centros de los tambores y la contribución de los arcos de contacto, de acuerdo con la Ecuación 2.10:

$$L = 2C + \pi D \quad (2.10)$$

donde $C = 1.07$ m corresponde a la distancia entre centros de los tambores y $D = 0.034$ m al diámetro del tambor. Sustituyendo los valores en la Ecuación 2.11:

$$L = 2(1.07) + \pi(0.034) = 2.247 \text{ m} \quad (2.11)$$

La velocidad lineal teórica de la banda se calculó mediante la Ecuación 2.12:

$$v_{teo} = \frac{\pi D N_{tambor}}{60} \quad (2.12)$$

obteniéndose el valor mostrado en la Ecuación 2.13:

$$v_{teo} = \frac{\pi(0.034)(21.7)}{60} = 0.0387 \text{ m/s} \quad (2.13)$$

equivalente a lo expresado en la Ecuación 2.14:

$$v_{teo} = 3.87 \text{ cm/s} \quad (2.14)$$

De manera experimental, se realizó una medición directa marcando la banda y midiendo el tiempo requerido para completar una vuelta completa. El tiempo registrado fue de $t = 1.07 \text{ min}$, equivalente a 64.2 s . La velocidad experimental se calculó mediante la Ecuación 2.15:

$$v_{exp} = \frac{L}{t} = \frac{2.247}{64.2} = 0.035 \text{ m/s} \quad (2.15)$$

lo que corresponde a la velocidad expresada en la Ecuación 2.16:

$$v_{exp} = 3.5 \text{ cm/s} \quad (2.16)$$

La similitud entre los valores teóricos y experimentales confirma la validez del modelo de cálculo y del método de medición empleado. La pequeña diferencia observada se atribuye a pérdidas mecánicas por fricción y tolerancias del sistema. Una comparación entre ambos resultados se presenta en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9.

Comparación de la velocidad de la banda transportadora

Método	Velocidad (cm/s)
Cálculo teórico	3.87
Medición experimental	3.50

2.7.6.3 Justificación de la velocidad de la banda para la detección por visión artificial

La selección del motor y, por ende, de la velocidad de la banda transportadora, se justificó en función de los requerimientos del sistema de visión artificial. La velocidad real de operación de la banda se determinó experimentalmente en aproximadamente 3.5 cm/s, lo que garantiza un tiempo suficiente para la correcta adquisición y procesamiento de imágenes del producto.

Considerando una longitud característica promedio del mango de 10 cm, el tiempo durante el cual el fruto permanece dentro del campo de visión de la cámara se estimó mediante la Ecuación 2.17:

$$t_{vis} = \frac{L_m}{v} = \frac{10}{3.5} \approx 2.86 \text{ s} \quad (2.17)$$

Este tiempo permite la captura de múltiples imágenes por cada mango en tiempo real. En consecuencia, el motor seleccionado es suficiente para garantizar una velocidad de transporte compatible con los requerimientos del sistema de visión artificial, priorizando la confiabilidad de la detección sobre la velocidad del proceso.

2.7.6.4 Cálculos del sistema de sellado

2.7.6.4.1 Dimensionamiento del elemento calefactor

El sistema de sellado térmico se diseñó bajo el principio de sellado por impulso, considerando una densidad de potencia típica para fundas de polipropileno (PP) de espesor fino. De acuerdo con valores prácticos reportados en aplicaciones similares, se adoptó una densidad de potencia promedio de 3 W/cm.

Considerando una longitud activa de sellado de $L_a = 12$ cm, la potencia requerida se calculó mediante la Ecuación 2.18:

$$P = L_a \cdot p_d = 12 \text{ cm} \cdot 3 \text{ W/cm} = 36 \text{ W} \quad (2.18)$$

2.7.6.4.2 Cálculo de la resistencia eléctrica

El sistema de sellado se alimenta con una fuente de 12 VDC. La resistencia eléctrica requerida para obtener la potencia calculada se determinó mediante la Ecuación 2.19:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{12^2}{36} = 4 \Omega \quad (2.19)$$

La corriente de operación correspondiente se obtuvo mediante la Ecuación 2.20:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A} \quad (2.20)$$

2.7.6.4.3 Selección del elemento resistivo

Para el elemento calefactor se seleccionó hilo de nicromio (NiCr 80/20) calibre 32 AWG, el cual presenta una resistencia típica de $33.4 \Omega/\text{m}$. La longitud activa requerida para alcanzar la resistencia calculada se obtuvo mediante la Ecuación 2.21:

$$L_a = \frac{R}{\rho_l} = \frac{4 \Omega}{33.4 \Omega/\text{m}} \approx 0.12 \text{ m} \quad (2.21)$$

Por lo tanto, se utilizó un tramo activo de 12 cm de hilo NiCr 80/20 calibre 32 AWG.

2.7.6.4.4 Densidad lineal de potencia

La densidad lineal de potencia del elemento calefactor se calculó mediante la Ecuación 2.22:

$$p_l = \frac{P}{L_a} = \frac{36 \text{ W}}{0.12 \text{ m}} = 300 \text{ W/m} \quad (2.22)$$

Este valor es adecuado para lograr un sellado efectivo del material sin degradación térmica, considerando el control temporal del impulso térmico. Un resumen de los parámetros eléctricos obtenidos se presenta en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10.

Parámetros eléctricos del sistema de sellado

Parámetro	Valor
Potencia del elemento calefactor	36 W
Resistencia eléctrica	4 Ω
Corriente de operación	3 A
Longitud de hilo de nicromio	0.12 m
Densidad lineal de potencia	300 W/m

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Descripción de pruebas realizadas

Para evaluar el desempeño del sistema desarrollado, se realizaron pruebas experimentales comparando el proceso manual tradicional con el proceso automatizado propuesto. Las evaluaciones se centraron únicamente en las etapas implementadas en esta investigación: transporte, inspección/clasificación y empaquetado/sellado.

Las pruebas se llevaron a cabo con un lote de 11 mangos, manteniendo condiciones similares en ambos escenarios para que la comparación de tiempos y resultados sea lo más justa posible. En el método manual, una persona trasladó los mangos entre estaciones, realizó la clasificación de forma visual y efectuó el empaquetado, registrándose el tiempo de cada etapa.

En el sistema automatizado se evaluó el funcionamiento integrado de la banda transportadora, la inspección por visión artificial mediante una cámara y un modelo entrenado con segmentación de imágenes, el mecanismo de desvío por actuadores para separar fruta no apta y el módulo de empaquetado y sellado basado en resistencias térmicas y actuadores.

Los tiempos se midieron por cronometraje manual en ambos métodos. Para el caso automatizado se consideró únicamente el tiempo de operación continua del sistema, excluyendo tiempos de preparación que se realizan una sola vez, como el montaje del rollo plástico en la selladora.

3.2 Resultados del modelo de visión artificial

3.2.1 Desempeño del modelo de clasificación

El desempeño del modelo de visión artificial se evaluó mediante pruebas experimentales realizadas directamente sobre el prototipo en operación. Para la validación se utilizó un lote de once (11) mangos, previamente clasificados de forma manual como referencia, considerando dos clases: mangos aptos (buenos) y mangos no aptos (malos), en función de defectos visibles en la superficie del fruto.

Las pruebas se realizaron bajo condiciones reales de funcionamiento, con iluminación ambiente, cámara fija y una velocidad constante de la banda transportadora de aproximadamente 3.5 cm/s. Los mangos fueron separados entre sí para evitar superposiciones durante la inspección. Estas condiciones permitieron evaluar el comportamiento del modelo en un escenario representativo de operación continua, similar al que se presentaría en un entorno productivo real.

3.2.2 Exactitud de clasificación obtenida

La exactitud del modelo de clasificación se evaluó comparando los resultados obtenidos por el sistema de visión artificial con la inspección manual realizada por un operador humano. Para esta prueba se utilizó un lote de once (11) mangos, previamente inspeccionados de forma visual, identificándose dos (2) frutos no aptos debido a manchas y defectos superficiales.

Durante la operación del sistema automatizado, el modelo de visión artificial clasificó correctamente los mismos dos mangos como defectuosos, coincidiendo completamente con el criterio humano. En estas condiciones de prueba, el sistema presentó una exactitud del 100% en la clasificación del lote evaluado, lo que valida el correcto desempeño del modelo bajo

condiciones reales de iluminación, velocidad de transporte y disposición del producto.

3.2.3 *Simulación del proceso manual*

En la Figura 16 se muestran las pruebas realizadas para simular el proceso manual de inspección y clasificación considerando el tiempo de transportarse desde la etapa de lavado hacia la zona de inspección. Esto se realizó como referencia para la comparación con el sistema automatizado.

Figura 23

Simulación del proceso manual de inspección visual de mangos



En la Figura 23 se muestran las pruebas realizadas para simular el proceso manual de inspección y clasificación, considerando el tiempo necesario para trasladar las frutas desde la

etapa de lavado hacia la zona de inspección.

3.2.4 Análisis de errores del modelo

Durante las pruebas experimentales realizadas en condiciones reales de operación, no se registraron errores de clasificación en el lote evaluado de mangos, observándose una coincidencia total entre la inspección manual y la clasificación automática realizada por el modelo de visión artificial. En todos los casos, los mangos defectuosos fueron correctamente identificados y desviados por el sistema.

No obstante, se identifican posibles fuentes de error para futuras pruebas, asociadas principalmente a variaciones bruscas de iluminación, superposición parcial de frutas en el enfoque de la cámara y presencia de defectos de muy baja visibilidad. Estos factores podrían afectar el desempeño del modelo en escenarios de mayor carga o condiciones no controladas.

3.2.5 Tiempo de inferencia y desempeño en tiempo real

Durante la operación del sistema automatizado, el modelo de visión artificial fue capaz de realizar inferencias en tiempo real sin afectar el flujo continuo del proceso. La clasificación de cada mango se realizó mientras el producto permanecía dentro del campo de visión de la cámara, sin generar retardos perceptibles en la banda transportadora ni en la activación de los actuadores de clasificación. Considerando la velocidad real de la banda transportadora y el tiempo de permanencia del mango frente a la cámara, el tiempo de inferencia del modelo resultó suficientemente bajo para permitir dos evaluaciones por enfoque

3.2.6 Alcance y limitaciones del modelo implementado

De acuerdo con los objetivos planteados inicialmente, el sistema de visión artificial fue concebido para permitir la clasificación de mangos considerando criterios de defectos

superficiales, color y grado de madurez. Sin embargo, en el alcance experimental del presente trabajo se implementó y validó únicamente el modelo orientado a la detección de defectos visibles en la superficie del fruto.

Esta decisión se fundamentó en criterios de tiempo, disponibilidad de datos etiquetados y prioridad funcional del sistema, ya que la detección de defectos representa el factor más crítico en la separación de fruta no apta para comercialización. Los modelos asociados a clasificación por color y estimación de madurez requieren conjuntos de datos específicos, control más estricto de iluminación y un proceso de calibración adicional que excedía el alcance temporal del prototipo desarrollado.

No obstante, la arquitectura del sistema fue diseñada de manera modular y escalable, permitiendo la integración de múltiples modelos de inteligencia artificial según el criterio de clasificación requerido. De esta forma, el sistema puede operar con distintos modelos intercambiables (defectos, color o madurez) en función de las necesidades del usuario final, planteándose la incorporación de dichos modelos como una extensión futura o servicio adicional del sistema.

3.3 Sistema de inspección y clasificación automatizada

El sistema de inspección y clasificación consistió la etapa encargada de evaluar la calidad del producto y separar las frutas malas y buenas de forma automatizada. Esta etapa permitió reemplazar la inspección visual del humano por un proceso repetible y objetivo, basado en visión por computadora usando el procesamiento por una laptop.

3.3.0.1 Funcionamiento general

Las frutas fueron transportadas sobre una banda horizontal y presentadas individualmente en forma de zigzag frente a una cámara digital levanta sobre un marco de la banda, manteniendo una separación aproximada de 7 cm entre unidades para evitar aglomeración durante la toma de imágenes. La cámara se conectó a una laptop, donde se ejecutó un modelo de visión artificial entrenado mediante segmentación de imágenes para la detección de defectos visibles.

El sistema procesó cada imagen en tiempo real, clasificando las frutas como buenas o malas con un umbral de decisión. En función del resultado, un servomotor accionó un mecanismo desviador que redirigió las frutas no aptas hacia un canal secundario ubicado en la izquierda y derecha de la banda, mientras que las frutas aptas continuaron su recorrido hacia la etapa de empaquetado.

3.3.0.2 Coordinación entre transporte e inspección

La velocidad de la banda transportadora fue configurada de manera constante para asegurar que cada fruta permaneciera el tiempo suficiente dentro del campo de visión de la cámara. Esta sincronización permitió garantizar una inspección individual y precisa sin requerir control avanzado de velocidad.

3.3.0.3 Rendimiento del sistema de clasificación

Durante las pruebas experimentales, el sistema procesó un lote de once (11) frutas distribuidas en dos columnas y en zigzag sobre la banda transportadora. El tiempo total requerido para la inspección y clasificación del lote fue de 48 segundos, identificándose

correctamente las frutas defectuosas, coincidiendo con los resultados obtenidos mediante inspección humana.

Considerando estos valores, el sistema presentó un tiempo promedio de clasificación de aproximadamente 4.36 segundos por fruta, demostrando una capacidad adecuada para operación continua en un entorno de prototipo.

3.4 Sistema de inspección y clasificación automatizada

El sistema de empaquetado y sellado compete a la etapa final del proceso automatizado y determinó la presentación final del producto para su comercialización. Esta etapa se diseñó para agrupar un número de 4 frutas y cerrar la funda de forma automática por medio de sellado térmico.

3.4.0.1 Funcionamiento general

Las frutas clasificadas como aptas fueron conducidas hacia el final de la banda para dejarlas caer en la selladora vertical, donde se formó la funda a partir de un rollo continuo de material plástico. El sellado vertical fue realizado mediante una banda continua accionada por dos motores de corriente continua de 12 V, encargados de generar el cordón longitudinal de la funda.

Una vez alcanzado el número definido de frutas por paquete (cuatro unidades), el sistema de servomotores accionó el sellado y corte horizontal del paquete gracias a un alambre de nicrom calentado eléctricamente, separando cada funda del rollo continuo.

3.4.0.2 Coordinación del sistema

El conteo de frutas se realizó de forma secuencial por medio de un sensor IR, permitiendo activar el sellado únicamente cuando se alcanzó la cantidad de 4 mangos programada. El sistema operó con velocidad fija gracias a la programación en el controlador (TB6612) para los motores, priorizando la simplicidad del diseño y la confiabilidad del proceso.

3.4.0.3 Rendimiento del sistema de empaquetado

Durante las pruebas experimentales, el tiempo requerido para sellar automáticamente un paquete de cuatro frutas fue de 18 segundos, sin considerar el tiempo de preparación inicial del sistema, como la colocación del rollo plástico.

Con base en este tiempo, el sistema presentó una capacidad aproximada de 3.3 paquetes por minuto, lo que equivale a cerca de 200 paquetes por hora en condiciones ideales de operación continua.

3.5 Resultados del proceso automatizado vs tradicional

3.5.1 Resultados de la etapa de inspección y clasificación

Para el proceso de clasificación manual por medio de la visión directa del humano, quien evaluó la superficie externa de cada una de las frutas, color y presencia de defectos visibles, si identificaron 2 frutas no aptas de las 11 del lote evaluado en un tiempo total de 60 segundos (incluido el tiempo de transporte de una estación a otra).

Mientras que la inspección y clasificación automatizada se llevó a cabo mediante el uso

de una cámara conectada al computador en el que se ejecutaba el modelo de visión artificial entrenado por segmentación de imágenes. El modelo entrenado fue capaz de identificar los defectos en la superficie del mango (manchas negras y cortes).

En la prueba se procesó un lote de 11 frutas, identificándose correctamente 2 frutas con manchas y cortes (defectuosas), coincidiendo con la clasificación realizada anteriormente con el humano. Se obtuvo que el tiempo total del proceso para un lote de 11 mangos fue de 48 segundos. Los resultados obtenidos en ambas pruebas se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.

Resultados de la inspección automatizada vs manual

Parámetro	Automatizada	Manual tradicional
Número de frutas	11	11
Frutas defectuosas	2	2
Tiempo de clasificación	48 s	60 s

3.5.2 Resultados de la etapa de empaquetado y sellado

Durante el empaquetado manual, el humano agrupó 4 frutas aptas de una funda plástica comercial, para luego ser cerrada mediante amarre manual. Este procedimiento se realizó para un solo paquete de 4 mangos buenos, marcando un tiempo total de operación de 30 segundos.

El sistema de empaquetado y sellado automático conformado por una selladora vertical de banda continua, impulsada por dos motores DC de 12V para formar el cordón vertical de la funda, mientras que el sello horizontal y corte entre paquetes se realizaron mediante un sistema de servomotores que accionaban el cierre empujando la funda contra un alambre de nicrom calentado eléctricamente.

El tiempo empleado para realizar el sellado de estas 4 frutas (un paquete) fue de 18 segundos, sin tomar en cuenta el tiempo de preparación del sistema para la colocación del rollo de material plástico. Los resultados comparativos del proceso manual y automatizado se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.

Resultados del empaquetado y sellado automatizado vs manual

Parámetro	Térmico (automatizado)	Manual
Frutas por paquete	4	4
Tiempo de sellado	18 s	30 s
Control	Velocidad fija	Humano

3.6 Análisis del desempeño del sistema

En base a los resultados obtenidos, se puede obtener una comparación directa entre los tiempos del proceso manual empleado y el sistema automatizado desarrollado. La comparación general de tiempos entre ambos métodos se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.

Comparación de tiempos entre proceso manual y automatizado

Etapa	Manual (s)	Automatizado (s)
Clasificación	60	48
Empaquetado	30	18

Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el sistema automatizado desarrollado permitió reducir significativamente el tiempo de empaque y sellado, también

cabe destacar que se eliminó la dependencia de la clasificación manual.

Aunque se observó que el tiempo de clasificación automatizada fue un poco más que el manual, el sistema empleado garantiza repetibilidad, constancia y operación continua sin fatiga a comparación del que se podría observar en el comportamiento humano según el número de ciclos de cada operación en cada una de las diferentes etapas.

De la misma manera, la clasificación por visión artificial mostró durante el procesamiento de las 11 muestras coincidencia y coherencia total con la inspección realizada por el humano en la detección de mangos defectuosos, evidenciando la efectividad del modelo entrenado.

3.7 Análisis de costos del prototipo desarrollado

3.7.1 Materiales eléctricos y electrónicos

Los costos asociados a los materiales eléctricos y electrónicos corresponden a los componentes utilizados para el accionamiento, sensado y control del sistema automatizado. Estos incluyen motores, servomotores, sensores infrarrojos, cámara de visión artificial, fuentes de alimentación, controladores y cableado.

Los materiales eléctricos y electrónicos utilizados en la construcción del módulo de transporte se presentan en la Tabla 3.4. De manera similar, los componentes eléctricos utilizados en el sistema de sellado se muestran en la Tabla 3.5. Finalmente, un resumen de los costos eléctricos totales del prototipo se presenta en la Tabla 3.6.

Tabla 3.4.*Materiales eléctricos y electrónicos de la banda transportadora*

Ítem	Descripción del material	Unidad	Cant.	Subtotal (\$)
1	Motor reductor DC 12 V, 36 rpm	und	1	22.00
2	Sensor infrarrojo (IR) de detección	und	4	14.00
3	Servomotor MG955	und	3	27.00
4	Cámara USB para visión artificial	und	1	18.00
5	Cable UTP (uso principal de señalado)	m	10	10.00
6	Cables jumper (varios, uso puntual)	lote	1	3.00
Subtotal banda transportadora				94.00

Tabla 3.5.*Materiales eléctricos y electrónicos del sistema de sellado*

Ítem	Descripción del material	Unidad	Cant.	Subtotal (\$)
1	Servomotor MG995	und	2	18.00
2	Sensor infrarrojo (IR)	und	1	3.50
3	Motor DC 12 V tipo GA	und	2	22.00
4	ESP32	und	1	10.00
5	Fuente de alimentación 12 V DC	und	1	15.00
6	Convertidor DC-DC 12 V a 5 V	und	1	5.00
7	Cable UTP	m	3	3.00
8	Borneras de conexión	und	6	6.00
9	Regleta de conexión eléctrica	und	1	4.00
Subtotal sistema de sellado				86.50

Tabla 3.6.*Resumen de costos de materiales eléctricos y electrónicos*

Sistema	Costo (USD)
Banda transportadora	94.00
Sistema de sellado	86.50
Total materiales eléctricos	180.50

El costo total de los materiales eléctricos y electrónicos empleados en la construcción del prototipo asciende a **USD 180.50**, considerando los subsistemas de transporte y sellado, tal

como se resume en la Tabla 3.6.

3.7.2 *Materiales mecánicos y estructurales*

Los materiales mecánicos y estructurales comprenden los elementos físicos necesarios para la construcción del prototipo, tales como perfiles de aluminio, ejes, rodillos, estructuras de MDF, piezas impresas en 3D, mordazas de sellado y elementos de fijación. Los materiales mecánicos correspondientes al sistema de transporte se presentan en la Tabla 3.7. De manera similar, los componentes estructurales utilizados en el sistema de sellado se muestran en la Tabla 3.8. Finalmente, el resumen de los costos mecánicos totales del prototipo se presenta en la Tabla 3.9.

Tabla 3.7.*Materiales mecánicos y estructurales de la banda transportadora*

Ítem	Descripción del material	Unidad	Cant.	Subtotal (\$)
1	Perfil de aluminio 2040	und	4	80.00
2	Eje liso 8 mm x 400 mm	und	2	8.80
3	Ángulos para perfilería	und	12	30.00
4	Chumacera de pared 8 mm	und	4	12.00
5	Soportes impresos en 3D para banda	und	28	15.40
6	Superficie MDF para sujeción de banda	und	8	2.80
7	Tornillería M5 + perno tipo T	und	85	28.90
8	Rodillo de PVC con juntas impresas	und	2	18.00
9	Tela para banda transportadora (15 cm x 1 m)	und	1	11.00
10	Acople flexible eje-motor	und	1	3.00
11	Piezas impresas 3D (soporte motor, cámara, guías)	und	1	65.00
Subtotal banda transportadora				274.90

Tabla 3.8.*Materiales mecánicos y estructurales del sistema de sellado*

Ítem	Descripción del material	Unidad	Cant.	Subtotal (\$)
1	Estructura de MDF para selladora	und	1	35.00
2	Impresión 3D de mordaza para sellado	und	1	15.00
3	Hoja de aluminio 50 x 50 cm	und	1	15.00
4	Bandas térmicas de sellado	und	2	6.00
5	Resistencias para selladora 300 mm	und	2	4.60
6	Rollo de filamento PLA	und	1	25.00
7	Material menor (tornillería, soportes, fijaciones)	lote	1	25.00
Subtotal sistema de sellado				125.60

Tabla 3.9.*Resumen de costos de materiales mecánicos y estructurales*

Sistema	Costo (USD)
Banda transportadora	274.90
Sistema de sellado	125.60
Total materiales mecánicos	400.50

El costo total de los materiales mecánicos y estructurales utilizados en el prototipo fue de **USD 400.50**, considerando los sistemas de transporte y sellado, tal como se resume en la Tabla 3.9.

3.7.3 Costos asociados al sistema de visión artificial

El sistema de visión artificial implementado en el prototipo se basa en el uso de una cámara digital comercial y una computadora personal para la ejecución del modelo de inteligencia artificial. A diferencia de soluciones industriales, no se requirió hardware especializado ni equipos dedicados de alto costo, ya que el procesamiento se realizó completamente en una laptop convencional.

Los costos asociados al sistema de visión artificial se limitan principalmente a la cámara USB utilizada para la captura de imágenes y al uso de recursos computacionales existentes. El modelo de clasificación fue desarrollado empleando herramientas de software de código abierto, por lo que no se incurrió en costos por licencias de entrenamiento o ejecución. Esta estrategia permitió implementar un sistema de inspección automatizada funcional con una inversión mínima.

3.7.4 Mano de obra

Las actividades relacionadas con el diseño, fabricación, ensamblaje y programación del prototipo se resumen en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10.*Mano de obra empleada en la construcción del prototipo*

Ítem	Actividad / Descripción	Subtotal (USD)
1	Diseño mecánico y electrónico del sistema	80.00
2	Fabricación de estructuras y piezas	70.00
3	Montaje mecánico general	50.00
4	Cableado y conexionado eléctrico	40.00
5	Programación y pruebas del sistema	60.00
Total		300.00

3.7.5 Costo total del prototipo

El costo total del prototipo desarrollado, considerando materiales eléctricos, materiales mecánicos y mano de obra, se presenta en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11.*Costo total del prototipo desarrollado*

Tipo	Costo (USD)
Materiales eléctricos y electrónicos	180.50
Materiales mecánicos y estructurales	400.50
Mano de obra	300.00
Costo total del prototipo	881.00

3.8 Estudio de factibilidad económica

El estudio de factibilidad económica se realizó con base en el prototipo desarrollado en el presente trabajo, considerando únicamente los subsistemas implementados y evaluados experimentalmente. En particular, el análisis se centró en los módulos de transporte mediante banda transportadora y el sistema de sellado automatizado, los cuales constituyen el alcance real del prototipo construido.

El objetivo de este análisis fue evaluar si la implementación de soluciones de automatización a pequeña escala, desarrolladas con materiales accesibles y fabricación propia, resulta económicamente viable para aplicaciones educativas, de investigación y para pequeños productores.

El costo total del prototipo desarrollado asciende a aproximadamente **USD 881.00**, considerando materiales eléctricos y electrónicos, materiales mecánicos y estructurales, así como la mano de obra empleada durante la fabricación, montaje y pruebas del sistema. Este valor corresponde a un prototipo funcional de baja capacidad, diseñado con fines demostrativos y de validación técnica.

Al comparar este costo con equipos comerciales disponibles en el mercado nacional o internacional, se observa que las máquinas industriales de sellado, clasificación y transporte automatizado presentan precios considerablemente más elevados, principalmente debido a su mayor capacidad productiva, nivel de automatización, robustez industrial y certificaciones asociadas. En plataformas comerciales internacionales, sistemas de características similares pueden alcanzar costos del orden de varios miles de dólares.

En este contexto, el prototipo desarrollado demuestra ser económicamente factible, al

ofrecer una solución funcional a un costo reducido, adecuada para entornos de bajo presupuesto y aplicaciones de pequeña escala. La reducción en la inversión inicial evidencia el potencial de la propuesta como alternativa accesible frente a soluciones industriales convencionales.

3.9 Comparativa con soluciones del mercado

Con el objetivo de contextualizar económicamente la propuesta desarrollada, se realizó una comparación entre los costos de los subsistemas implementados en esta tesis y equipos comerciales disponibles en el mercado internacional. La comparación se centra únicamente en los módulos efectivamente construidos y evaluados: la banda transportadora y el sistema de empaquetado y sellado.

3.9.0.1 Banda transportadora

Las bandas transportadoras de uso alimenticio disponibles comercialmente presentan un amplio rango de precios, los cuales dependen principalmente del material de fabricación, el ancho de la banda, la longitud y el nivel de automatización. En mercados internacionales, este tipo de equipos puede presentar costos aproximados entre USD 1000 y USD 3000 [18].

En el prototipo desarrollado, la banda transportadora fue diseñada y fabricada empleando perfiles de aluminio, componentes comerciales de bajo costo y piezas impresas en 3D, logrando un subsistema funcional con un costo total aproximado de USD 368.90. Este valor permitió cubrir adecuadamente los requerimientos de transporte continuo del producto hacia la etapa de inspección, sin necesidad de recurrir a soluciones industriales de mayor costo.

3.9.0.2 Sistema de sellado

Los equipos comerciales de empaquetado y sellado automático de tipo vertical (VFFS) disponibles en el mercado internacional presentan costos significativamente superiores, incluso para configuraciones compactas y de baja capacidad. De acuerdo con listados de proveedores internacionales, este tipo de maquinaria puede alcanzar valores superiores a los USD 8000, sin considerar costos adicionales asociados a importación, instalación y adaptación a una línea específica [19].

En contraste, el sistema de sellado implementado en este proyecto fue desarrollado específicamente para una aplicación de baja capacidad, utilizando motores DC, servomotores, resistencias térmicas y una estructura fabricada con materiales accesibles. El costo total del subsistema de sellado fue de aproximadamente USD 212.10, logrando cumplir con la función de conformado y sellado del empaque dentro del alcance experimental del prototipo.

En conjunto, la comparación evidencia que el diseño y construcción de subsistemas propios permitió una reducción significativa en la inversión económica, manteniendo las funciones esenciales requeridas para el proceso. Esta diferencia de costos refuerza la viabilidad de la propuesta para aplicaciones de pequeña escala, especialmente en contextos donde el acceso a maquinaria industrial resulta limitado por factores económicos.

3.9.0.3 Sistemas comerciales de inspección por visión artificial

En el mercado existen sistemas comerciales de inspección por visión artificial utilizados en la industria agroalimentaria para la detección de defectos, clasificación por color y tamaño, y control de calidad. Estas soluciones suelen integrar cámaras industriales, sistemas de

iluminación controlada y unidades de procesamiento dedicadas, lo que incrementa significativamente su costo.

De acuerdo con catálogos de proveedores internacionales de maquinaria industrial, los sistemas comerciales de inspección visual para frutas pueden presentar costos que superan los USD 5000, dependiendo del nivel de automatización, precisión y capacidad de procesamiento [20]. En contraste, el sistema desarrollado en este proyecto logra una funcionalidad comparable a nivel experimental utilizando hardware de bajo costo y software libre, reduciendo de forma considerable la inversión inicial y demostrando la viabilidad de aplicar inteligencia artificial en contextos de pequeña escala y bajo presupuesto.

3.10 Manual de operación

El presente manual tiene como objetivo guiar al usuario en la correcta operación del prototipo desarrollado. Se describen de manera general los componentes principales del sistema, el procedimiento de encendido y apagado, así como la secuencia básica de funcionamiento durante la operación normal.

3.10.1 Descripción general del sistema

El prototipo está diseñado para realizar de forma integrada las siguientes etapas del proceso postcosecha:

- **Lavado:** limpieza inicial del producto para retirar impurezas superficiales (etapa previamente implementada).
- **Transporte:** desplazamiento automático de las frutas mediante una banda transportadora continua hacia la zona de inspección.

- **Inspección y clasificación:** evaluación automática del estado de la fruta mediante visión por computadora, empleando una cámara y un modelo de inteligencia artificial ejecutado en una laptop. Las frutas no aptas son desviadas mediante un actuador.
- **Empaquetado y sellado:** agrupación automática de frutas y sellado de fundas plásticas mediante un sistema de sellado térmico con alambre de nicrom y accionamiento electromecánico.

3.10.2 Componentes principales

El sistema está compuesto por los siguientes elementos:

- Sistema de alimentación eléctrica (fuentes de 110V, 24V, 12 V y 5 V según subsistema).
- Banda transportadora de alimentación a inspección.
- Sistema de lavado (tina, bomba de agua y banda elevadora).
- Cámara digital para inspección visual.
- Laptop para ejecución del modelo de visión por computadora.
- Sistema de clasificación mediante actuador servo-mecánico.
- Selladora vertical de fabricación propia (motores DC, servomotores y alambre de nicrom).
- Microcontrolador ESP32 para control de motores, servos y secuencias.
- Sensores IR de conteo para empaquetado.
- Estructura mecánica de soporte.

- Motorreductor y sensores infrarrojo.
- Panel de control (encendido, apagado y ajustes básicos).

3.10.3 Verificaciones previas a la operación

Antes de encender el prototipo, el operador debe verificar las siguientes condiciones:

1. Alimentación eléctrica

- Hay que confirmar que el sistema esté conectado a una fuente estable de 110 VAC.
- Verificar que no existan cables sueltos, dañados o conexiones defectuosas.

2. Sistema de lavado

- Comprobar que la tina cuente con el nivel adecuado de agua.
- Revisar que la bomba y las tuberías no presenten obstrucciones.
- Verificar que las válvulas de entrada y salida estén abiertas.

3. Banda transportadora

- Revisar que la banda esté limpia y libre de objetos extraños.
- Hay que confirmar que se encuentre correctamente alineada y tensionada.

4. Sistema de inspección

- Verificar que la cámara esté correctamente posicionada y enfocada.
- Hay que confirmar que la iluminación sea adecuada para la inspección.
- Comprobar la ejecución correcta del software de visión artificial.

5. Sistema de sellado

- Inspeccionar el alambre de nicrom, asegurando que no presente daños ni falsos contactos.
- Verificar que el recorrido del plástico esté correctamente guiado.
- Confirmar el funcionamiento de motores y servomotores de la selladora.

3.10.4 Arranque y apagado del prototipo

El prototipo dispuso de dos modos de operación:

1. **Modo automático:** las etapas del proceso operaron de forma integrada (lavado, transporte y sellado) mediante la lógica programada en el controlador. En este modo, el operador únicamente inició el sistema y supervisó su funcionamiento.
2. **Modo manual:** cada etapa pudo activarse de manera independiente, sin intervención del control automático. Este modo se empleó ante fallas del modo automático o cuando se requirió operar una etapa de forma aislada para pruebas, mantenimiento o limpieza.

3.10.4.1 Arranque en modo automático

1. Coloque el selector de modos en la posición *Automático*.
2. Presione los botones de marcha correspondientes a la bomba y al motor.
3. Verifique que los indicadores de marcha se enciendan en color verde.
4. El controlador ejecutó la secuencia programada:
 - Se activó el sistema de lavado.

- Se puso en marcha la banda transportadora.
 - Se habilitó el sistema de sellado una vez cumplida la secuencia de operación, en función de la señal del sensor infrarrojo.
5. El prototipo quedó habilitado para procesar productos de forma continua, sin intervención directa del operador.

3.10.4.2 Arranque en modo manual

1. Coloque el selector de modos en la posición *Manual*.
2. Según la necesidad, accione individualmente cada etapa desde el panel de control:
 - **Botón de lavado:** habilitó el paso de agua.
 - **Botón de transporte:** encendió la banda transportadora.
3. Al finalizar la operación requerida, apague manualmente cada etapa.

3.10.4.3 Apagado del prototipo

1. Presione el botón de paro en el panel de control.
 - En modo automático, el controlador detuvo la secuencia y deshabilitó el sellado, la banda transportadora y el sistema de lavado (si estaban activos).
2. Espere unos segundos hasta que la resistencia de nicrom se enfríe.
3. Coloque el interruptor general de energía en posición *OFF*.
4. Cierre la válvula de agua si el prototipo no será utilizado nuevamente en el corto plazo.

5. Desenergice totalmente el prototipo.
6. Retire los residuos sobrantes de la tina de lavado.
7. Almacene el equipo y cúbralo para protegerlo de la intemperie.

3.11 Manual de mantenimiento

3.11.1 Mantenimiento diario

Se ejecuta antes y después de la operación del prototipo:

- Limpieza de la banda transportadora y superficies de contacto.
- Limpieza del área de inspección y lente de la cámara.
- Retiro de residuos de plástico en la selladora.
- Inspección visual de cables, conectores y sensores.

3.11.2 Mantenimiento semanal

Se realiza para asegurar el buen estado de los componentes mecánicos y eléctricos:

- Verificación de tensión y alineación de la banda transportadora.
- Revisión del estado de engranajes, ejes y soportes.
- Comprobación del correcto funcionamiento de servomotores y motores DC.
- Revisión de fijaciones mecánicas y tornillería.

3.11.3 Mantenimiento mensual

Su objetivo es prevenir fallas mayores y conservar la integridad del sistema:

- Revisión detallada del sistema eléctrico y drivers.
- Evaluación del desgaste del alambre de nicrom y sustitución si es necesario.
- Pruebas de funcionamiento del sistema de clasificación y sellado en vacío.
- Recalibración de la posición de la cámara y del actuador de clasificación.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones Este último capítulo resume los principales aportes del proyecto desarrollado, donde se analiza el cumplimiento de los objetivos planteados, la relevancia de los resultados que se obtuvieron y las implicaciones técnicas del sistema diseñado. Asimismo, se presentan a continuación las recomendaciones orientadas a la mejora y ampliación del sistema en futuros trabajos.

4.1 Conclusiones

Luego de aplicar las diferentes fases de diseño, implementación y validación del sistema propuesto, se obtuvieron las siguientes conclusiones, las cuales se presentan en función del cumplimiento de los objetivos planteados y los resultados experimentales alcanzados:

- Se cumplió el objetivo general de diseñar e implementar una máquina automatizada para el lavado, inspección, clasificación y empaquetado de frutas, integrando visión artificial y sistemas electromecánicos, logrando mejorar el flujo del proceso y reducir la intervención manual en etapas críticas de la línea.
- Se rediseñó e integró correctamente la estructura mecánica de la planta automatizada, incorporando una banda transportadora, soportes, sistema de clasificación y módulo de sellado, lo que permitió una operación continua, estable y segura durante las pruebas experimentales realizadas.
- Se implementó un sistema de inspección por visión artificial orientado a la detección de defectos visibles en la superficie del fruto, logrando identificar correctamente los mangos defectuosos en todas las pruebas realizadas. Aunque el objetivo específico contemplaba la identificación por madurez, color y defectos, en el alcance de este

proyecto se priorizó la detección de defectos, debido a limitaciones de tiempo, disponibilidad de datos y enfoque experimental del prototipo.

- Los resultados obtenidos demostraron que el modelo de visión artificial implementado presenta un desempeño confiable bajo condiciones reales de operación, coincidiendo completamente con la inspección manual en la identificación de frutas no aptas, lo que valida su aplicabilidad para sistemas de clasificación automatizados a pequeña escala.
- Se diseñó e implementó un sistema automático de empaquetado y sellado funcional, logrando reducir el tiempo de sellado de un paquete de 4 mangos de 30 segundos en el método manual a 18 segundos en el sistema automatizado, evidenciando una mejora significativa en eficiencia.
- El uso de componentes y controladores de bajo costo, como la ESP32 y una computadora personal para el procesamiento del modelo de visión artificial, demostró ser suficiente para automatizar el sistema sin recurrir a soluciones industriales complejas, reduciendo costos y facilitando la replicabilidad del prototipo.
- El prototipo desarrollado presentó una mejora global en productividad y eficiencia frente al proceso manual tradicional, confirmando que la automatización de etapas clave aporta beneficios claros para plantas de pequeña escala y pequeños productores.

4.2 Recomendaciones

Luego de culminar el desarrollo del sistema propuesto y analizar los resultados obtenidos, se plantean las siguientes recomendaciones y trabajos futuros:

- Ampliar el sistema de visión artificial mediante la incorporación de modelos adicionales orientados a la clasificación por color y nivel de madurez del fruto, de forma que el sistema pueda adaptarse a distintos criterios de clasificación según las necesidades del usuario o del mercado objetivo.
- Implementar una arquitectura modular de modelos de inteligencia artificial, donde el usuario pueda seleccionar el tipo de clasificación requerida (defectos, color o madurez), permitiendo que la planta se adapte dinámicamente sin modificaciones mecánicas, únicamente cambiando el modelo de procesamiento.
- Desarrollar y entrenar modelos específicos para clasificación por color (verde, amarillo, rojo) y madurez fisiológica, utilizando bases de datos más amplias y controladas, lo cual permitiría ofrecer estas funcionalidades como servicios adicionales en una futura versión comercial del sistema.
- Incrementar el volumen y diversidad del conjunto de datos utilizado para el entrenamiento de los modelos, incluyendo variaciones de iluminación, tamaño y estado del fruto, con el fin de mejorar la robustez del sistema ante condiciones reales de operación industrial.
- Implementar control avanzado de velocidad y sincronización en la banda transportadora, incorporando sensores de retroalimentación que permitan ajustar el flujo de productos según el tipo de modelo de visión artificial utilizado.
- Evaluar el desempeño del sistema con mayores volúmenes de producción y en escenarios reales de operación, lo que permitiría validar su escalabilidad y factibilidad para aplicaciones comerciales o comunitarias.

Referencias bibliográficas

- [1] S. A. Adegbite, S. K. Adeyemi, A. O. Komolafe, M. O. Salami, C. F. Nwaeche, and A. A. Ogunbiyi, "Design and development of fruit washer," *Journal of Scientific Research & Reports*, vol. 21, no. 6, pp. 1–11, 2019. DOI: 10.9734/JSRR/2018/46041.
- [2] R. Deka, P. P. Borthakur, E. Baruah, P. Sarmah, and A. Saikia, "A comprehensive review on mechanical conveyor systems: Evolution, types, and applications," *ADRI International Journal of Engineering and Natural Science*, vol. 8, no. 12, pp. 1–10, 2024.
- [3] A. Abu Toha, H. Ahmad, and X. Lee, "Iot-based embedded systems for precision agriculture: Design and implementation," *SCCTS Journal of Embedded Systems Design and Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 21–29, 2025. DOI: 10.31838/ESA/02.02.03.
[Online]. Available: <https://ecejournals.in/index.php/ESA/article/view/131>.
- [4] K. Peker, M. Yildiz, and S. Turgay, "Improving quality inspections with image analysis and artificial intelligence," *Advances in Computer Science Research*, vol. 29, pp. 122–129, 2023. [Online]. Available: <https://www.clausiuspress.com/article/9824.html>.
- [5] S. Kaur, "A comprehensive survey of deep learning models across diverse application domains," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 12, no. 22s, pp. 2176–2178, 2024. [Online]. Available: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7656>.

- [6] Z. Zhang and J. Li, “A review of artificial intelligence in embedded systems,” *Micromachines*, vol. 14, no. 5, p. 897, 2023. DOI: 10.3390/mi14050897.
- [7] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, “Deep learning in agriculture: A survey,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, pp. 70–90, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2018.02.016.
- [8] M. E. Dauthy, *Fruit and Vegetable Processing* (FAO Agricultural Services Bulletin 119). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/v5030e/V5030E0i.htm#Chapter%20%20Fruit%20specific%20preservation%20technologies>.
- [9] S. A. Adegbite, S. K. Adeyemi, A. O. Komolafe, M. O. Salami, C. F. Nwaeche, and A. A. Ogunbiyi, “Design and development of fruit washer,” *Journal of Scientific Research & Reports*, vol. 21, no. 6, pp. 1–11, 2019. DOI: 10.9734/JSRR/2018/46041. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://journaljsrr.com/index.php/JSRR/article/view/924/1848>.
- [10] J. Core, “Scientists seek to sanitize fruits and vegetables,” *Agricultural Research*, vol. 50, no. 3, 2002. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://agresearchmag.ars.usda.gov/2002/mar/fruit/>.
- [11] “Bandas transportadoras para frutas y verduras.” Ficha técnica y aplicaciones para cosecha, lavado, corte, empaquetado y transporte, Esbelt, S.A.U., Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.esbelt.com/bandas-alimentarias/bandas-para-frutas-y-verduras/>.

- [12] L. Hrabovský and J. Fries, “Transport performance of a steeply situated belt conveyor,” *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 7984, 2021. DOI: 10.3390/en14237984. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/7984>.
- [13] R. Deka, P. P. Borthakur, E. Baruah, P. Sarmah, and A. Saikia, “A comprehensive review on mechanical conveyor systems: Evolution, types, and applications,” *ADRI International Journal of Engineering and Natural Science*, vol. 8, no. 12, pp. 1–10, 2024, Disponible en ResearchGate y en el portal oficial del ADRI International Journal. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://ijnes.org/index.php/ijnes/article/view/801/599>.
- [14] L. Kitinoja and A. A. Kader, *Small-scale postharvest handling practices: A manual for horticultural crops (4th ed.)* Post-harvest Horticulture Series No. 8E; slightly revised Nov. 2003, University of California, Davis / FAO, 2002. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/ae075e/ae075e00.htm>.
- [15] I. E. Pazmiño Medina, “Construcción de un prototipo de máquina clasificadora y transportadora de frutas de acuerdo al tamaño para supermercados,” M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2012. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4596>.
- [16] A. Gutiérrez Vega, “Diseño, montaje y automatización de una máquina empacadora de productos granulados en lámina polimérica por medio de sellos de calor,” Trabajo de grado, M.S. thesis, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2005. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1992/22193>.

- [17] E. P. L. Moreno and W. P. T. Flores, "Diseño y construcción de una empacadora y selladora al vacío para humitas, con capacidad de 15 humitas por minuto," Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM), M.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2618>.
- [18] "Pvc conveyor belt (showroom y listados de proveedores)." Página de listados consultada para rangos referenciales de precios de bandas transportadoras., Alibaba.com, Accessed: Jan. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.alibaba.com/showroom/pvc-conveyor-belt.html>.
- [19] "Small vertical form fill seal machine (showroom y listados de productos)." Página de listados consultada para precios referenciales de máquinas VFFS compactas., Alibaba.com, Accessed: Jan. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.alibaba.com/showroom/small-vertical-form-fill-seal-machine.html>.
- [20] Alibaba Group, *Fruit vision inspection system for sorting and quality control*, <https://www.alibaba.com/showroom/fruit-vision-inspection-system.html>, Accedido en enero de 2026, 2024.

Apéndices

Apéndice A: Recursos digitales del proyecto

En este apéndice se presentan los recursos digitales asociados al desarrollo del sistema automatizado de inspección, clasificación y sellado de frutas. Estos recursos complementan la información presentada en el cuerpo del documento y permiten la reproducción y análisis del prototipo desarrollado.

A.1 Repositorio de código del sistema

El código fuente correspondiente a la implementación del sistema de visión artificial, la lógica de clasificación y la comunicación con el microcontrolador ESP32 se encuentra disponible en el siguiente repositorio:

Repositorio **GitHub:** <https://github.com/omarhfhf31-bit/MI-MangoDeteccion/blob/3ee24abf9b803df764ccdd803eafdc1777810cd/mainESP32.cpp>

El repositorio incluye los scripts de entrenamiento del modelo, los archivos de inferencia en tiempo real y el código de control del sistema.

A.2 Modelo entrenado y dataset

El modelo de visión artificial entrenado, así como el conjunto de datos utilizado para el proceso de entrenamiento y validación, se encuentran disponibles en una carpeta compartida, accesible mediante el siguiente enlace:

Modelo: <https://github.com/omarhfhf31-bit/MI-MangoDeteccion/blob/3ee24abf9b803df764ccdd803eafdc1777810cd/best.pt>

Código de entrenamiento: <https://github.com/omarhfhf31-bit/MI-MangoDeteccion/blob/3ee24abf9b803df764ccdd803eafdc1777810cd/best.pt>

MangoDeteccion/blob/3ee24abf9b803df764ccdd803eafdc1777810cd/modelTraining.py

A.3 Archivos de diseño mecánico

Los archivos de diseño mecánico desarrollados para la estructura de la banda transportadora, el sistema de sellado y los soportes impresos en 3D se encuentran disponibles en la siguiente carpeta:

Archivos CAD y diseños 3D:

[https://drive.google.com/drive/folders/1KoxQhUMh8BdmVBbPvXr1ZRIMQNPR4D1-
?usp=drive_in](https://drive.google.com/drive/folders/1KoxQhUMh8BdmVBbPvXr1ZRIMQNPR4D1-?usp=drive_in)

Apéndice B: Datos técnicos

Este apéndice presenta datos técnicos de referencia utilizados durante el diseño y dimensionamiento de los principales subsistemas del prototipo. La información incluida respalda las decisiones adoptadas en las etapas de transporte, inspección y sellado.

B.1 Apéndice B. Datos técnicos de referencia del sistema

Las características técnicas del motor reductor utilizado en el sistema de transporte se presentan en la Tabla B.1. Estos valores se utilizaron como referencia para el dimensionamiento del sistema de accionamiento de la banda transportadora.

Tabla B.1.

Características técnicas del motor reductor DC 25GA370

Parámetro	Valor
Tensión nominal	12 V DC
Velocidad nominal	36 rpm
Tipo de reductor	Engranajes metálicos
Corriente nominal	1.2 A
Torque nominal	Alto torque
Aplicación	Banda transportadora

Nota: Valores referenciales tomados de hojas técnicas del fabricante.

Las especificaciones técnicas de los servomotores utilizados en el sistema de clasificación y sellado se muestran en la Tabla B.2. Estos actuadores permiten el movimiento de compuertas y mecanismos de sellado dentro del prototipo.

Tabla B.2.*Características técnicas de los servomotores MG955 y MG995*

Parámetro	Valor
Tensión de operación	5–6 V DC
Torque máximo	9–11 kg·cm
Ángulo de giro	180°
Tipo de engranaje	Metálico
Aplicación	Clasificación y sellado

Los valores de corriente admisible para hilo de nicrom en función de la temperatura de operación se presentan en la Tabla B.3. Esta información fue utilizada como referencia para el dimensionamiento del elemento calefactor del sistema de sellado térmico.

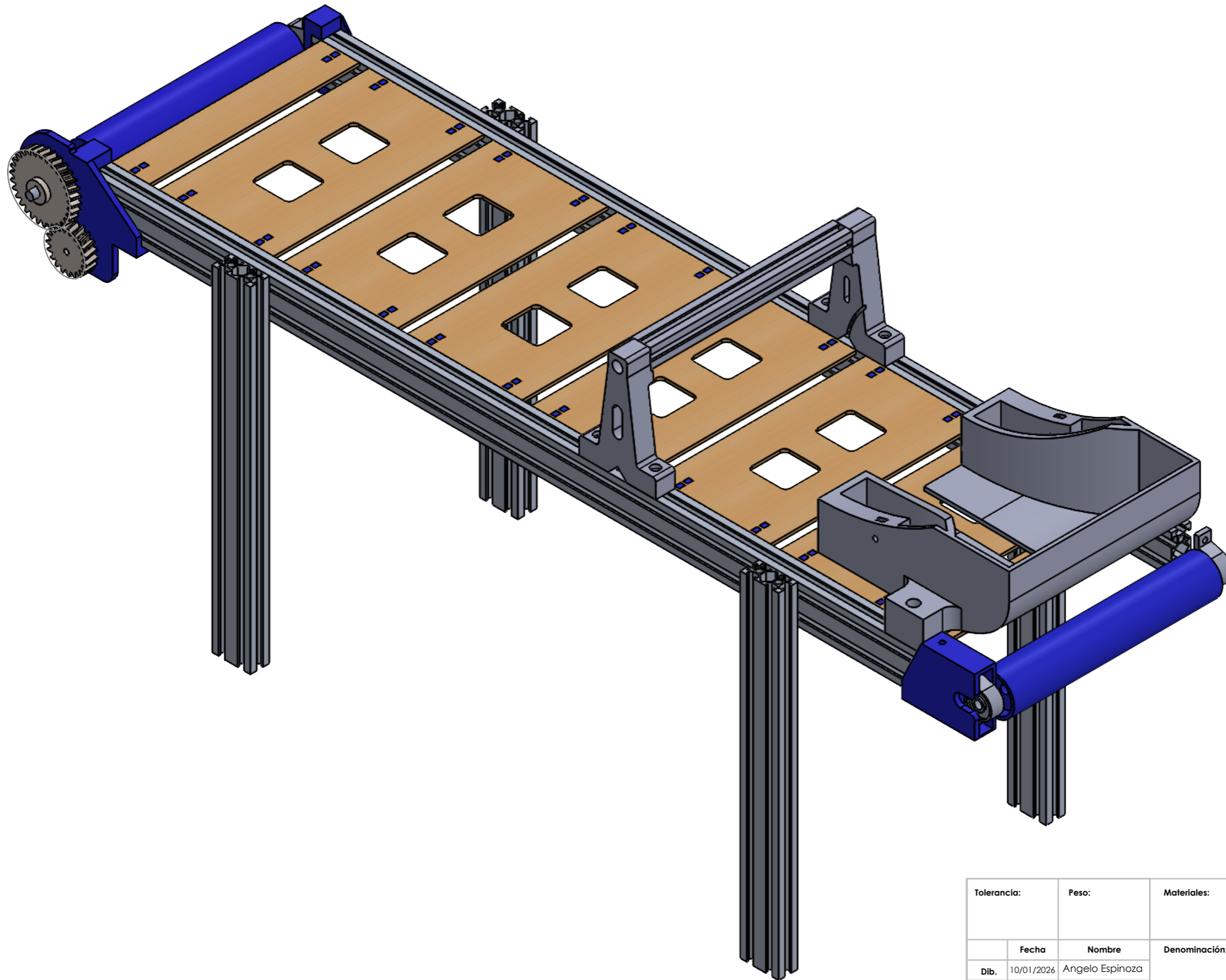
Tabla B.3.*Ampicidad del hilo de nicrom en función de la temperatura*



AWG	200 °C	500 °C	800 °C	1000 °C	1100 °C
10	16.2 A	37.5 A	56.0 A	80.0 A	92.0 A
16	6.4 A	13.7 A	20.9 A	29.4 A	33.6 A
18	4.8 A	10.1 A	14.8 A	20.7 A	23.7 A
20	3.8 A	7.6 A	11.0 A	15.2 A	17.5 A
24	2.21 A	4.2 A	6.0 A	8.2 A	9.4 A

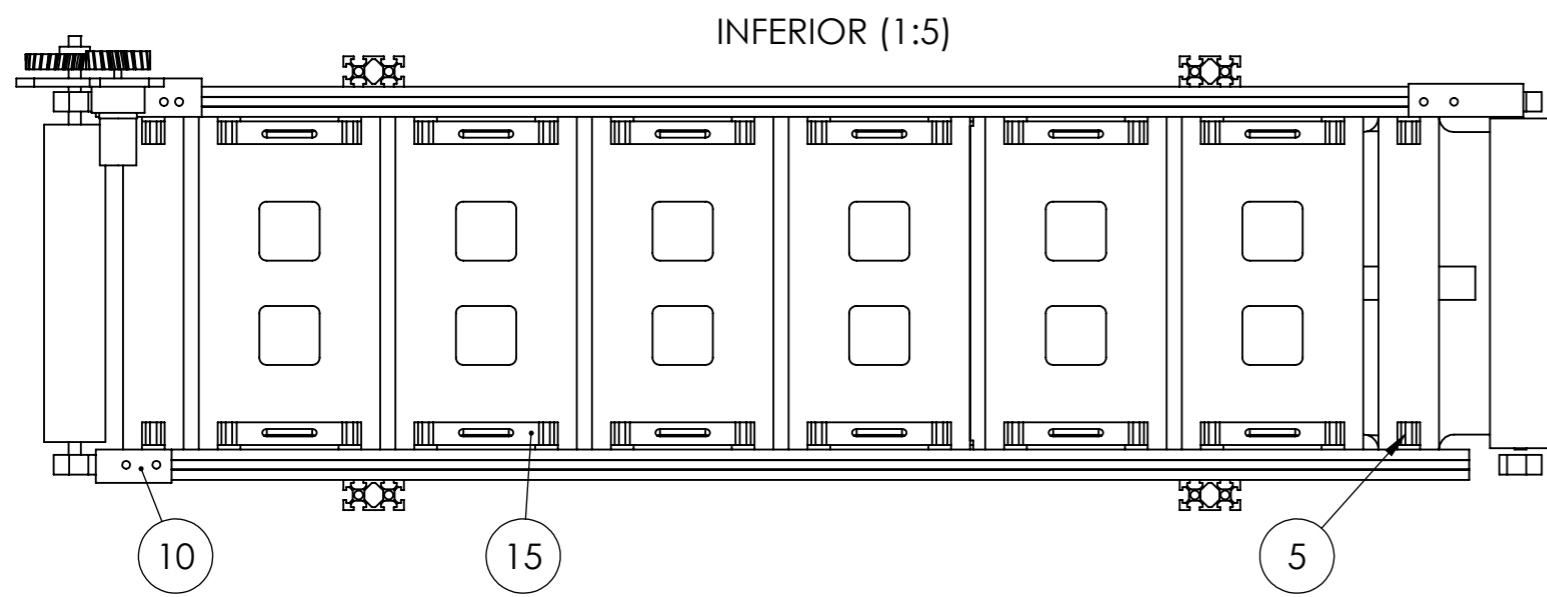
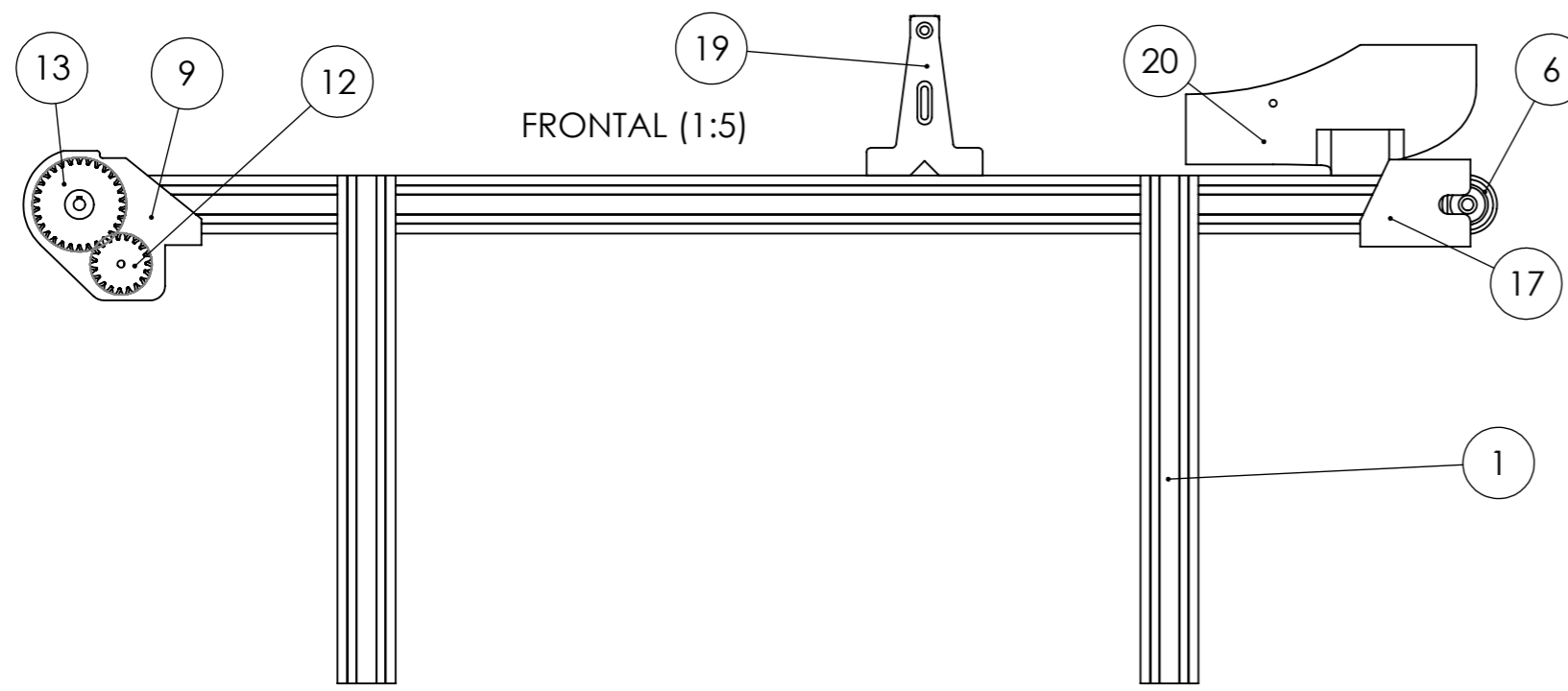
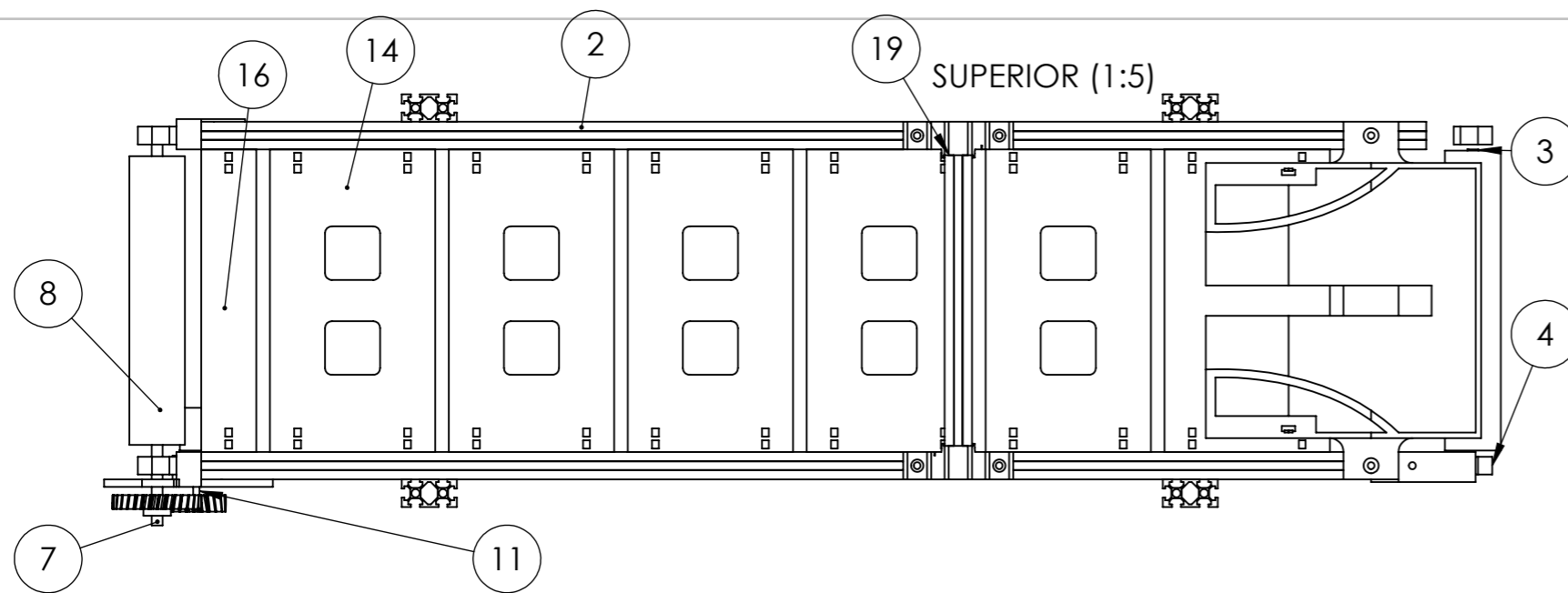
Nota: Valores referenciales de corriente admisible para hilo de nicrom en función de la temperatura de operación. Adaptado de Nicromel (s. f.).

Apéndice C: Planos de diseño de los subsistemas

Este apéndice presenta los planos utilizados durante el diseño y dimensionamiento estructural de los principales subsistemas del prototipo. La información incluida evidencia las medidas de diseño, cotas, material y partes adoptadas en las etapas de transporte, inspección y sellado.



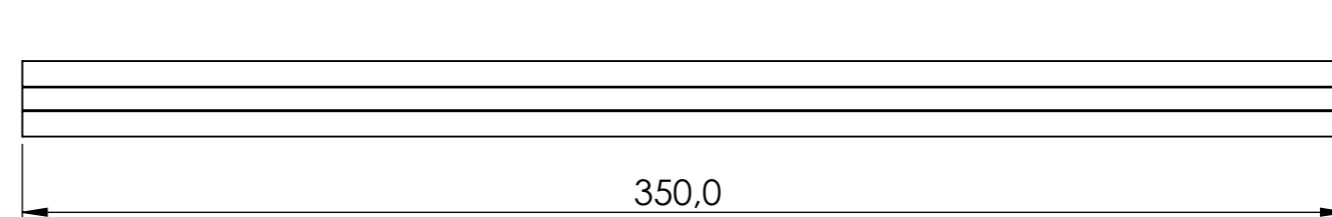
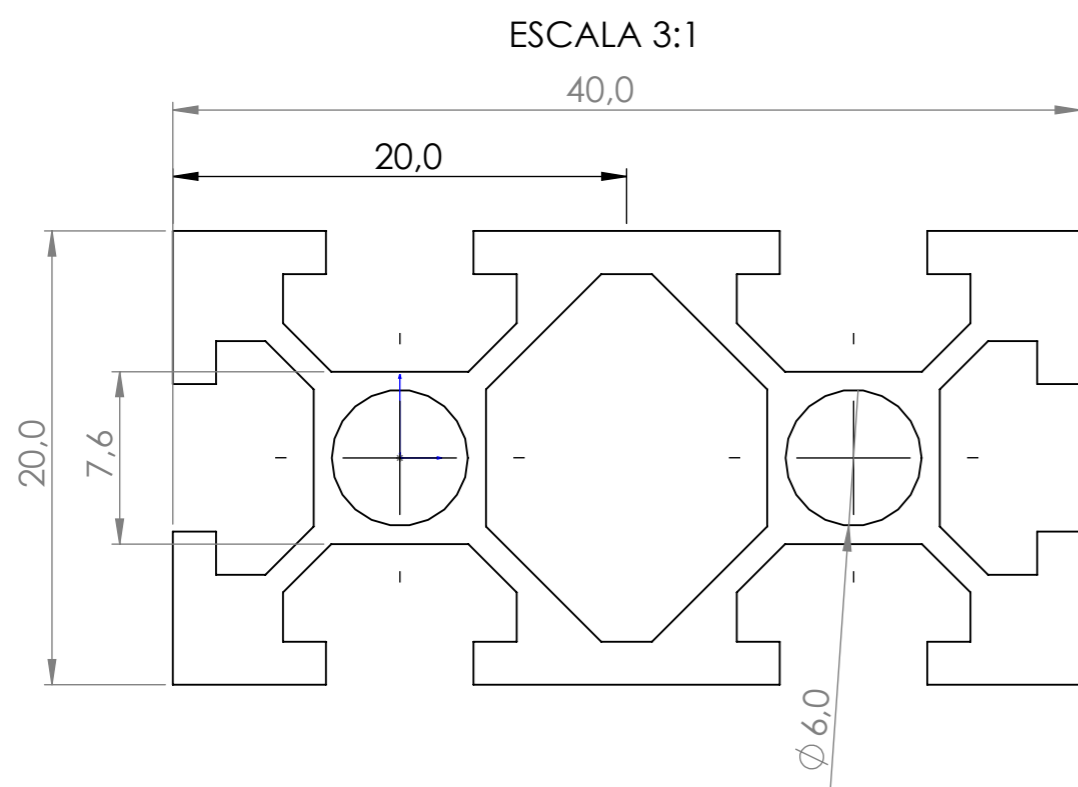
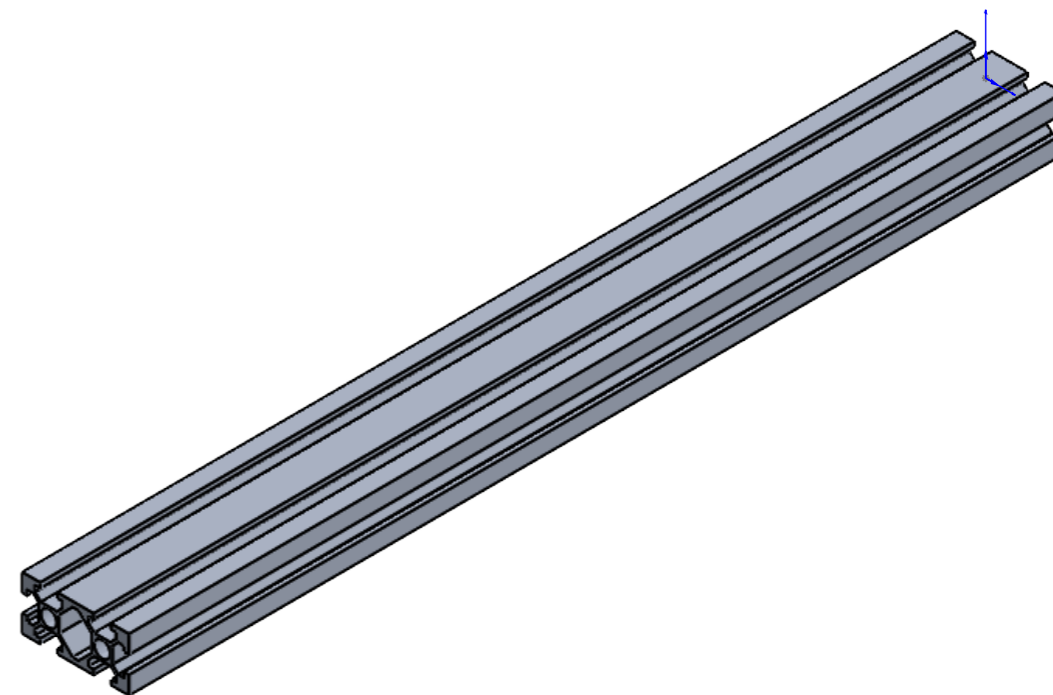
Tolerancia:	Peso:	Materiales:	VARIOS	
			RENDERIZADO	Escala 1:3
				A3
			N° de Dibujo	01
			Sustituye a:	





N.º	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	base_aluminio2040_p	aluminio	4
2	base_aluminio2040_b	aluminio	2
3	eje1	acero inoxidable	1
4	kp08	hierro fundido	4
5	angulo_sug_doble	pla	4
6	cilindro	pla	1
7	eje2	acero inoxidable	1
8	cilindro1	pla	1
9	sopt	pla	1
10	sopt1	pla	1
11	MOTOR	metal	1
12	Metric - LH Helical gear 2M 19T 10HA 20PA 12FW --- 19N75H50L5.0N	pla	1
13	Metric - RH Helical gear 2M 30T 10HA 20PA 10FW --- 30O20H15L8.0S1	pla	1
14	sopote_largo	mdf	6
15	angulo_sug	pla	12
16	sopote_largo2	mdf	2
17	sopt2	pla	1
19	base_aluminio2020_bandas	aluminio	1
19	base_sensor	pla	2
20	apriete_v	pla	1

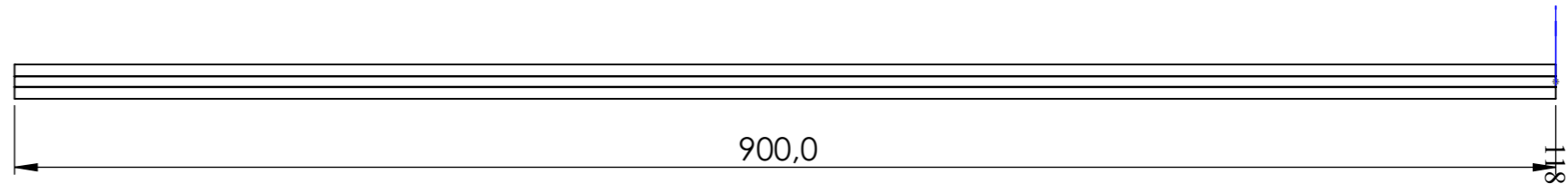
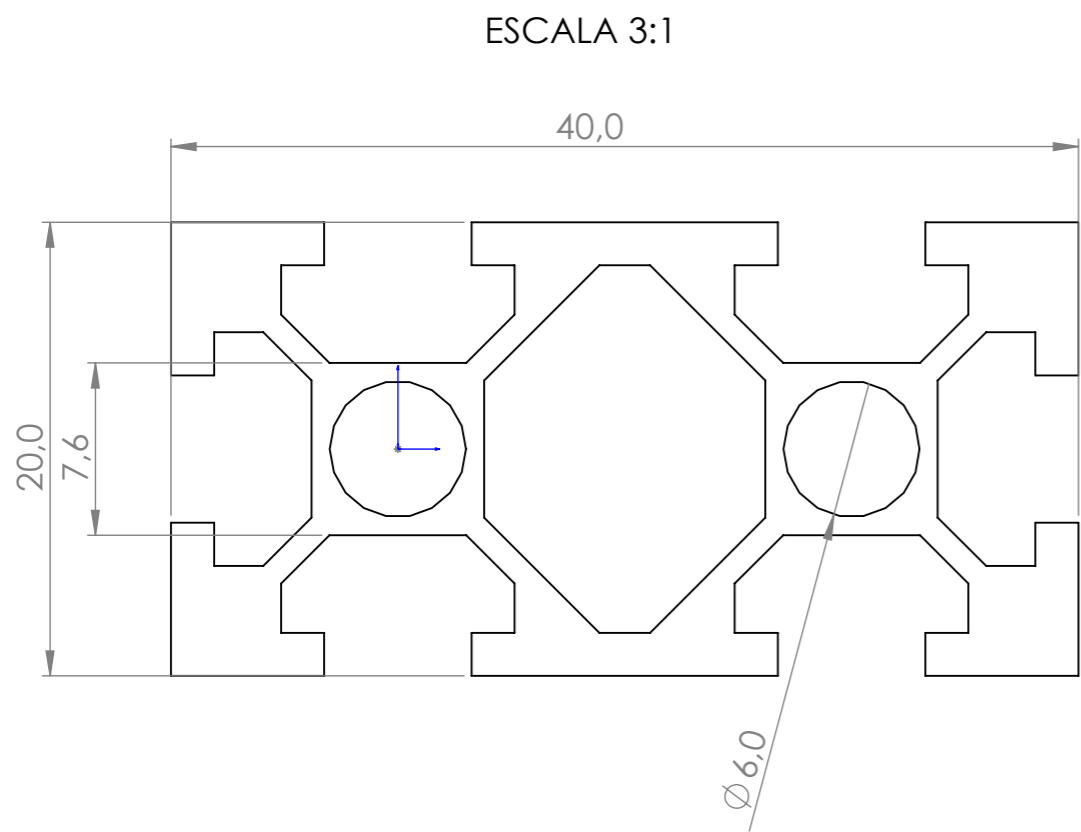
Tolerancia:	Peso:	Materiales:	VARIOS
Fecha	Nombre	Denominación:	Escala 1:5
Dib. 10/01/2026	Angelo Espinoza	Explotado de la banda	A3
Rev. 10/01/2026	Cristhian Flores		
Aprob. 10/01/2026	Angelo Espinoza		
Nº de Dibujo		01	
Sustituye a:			



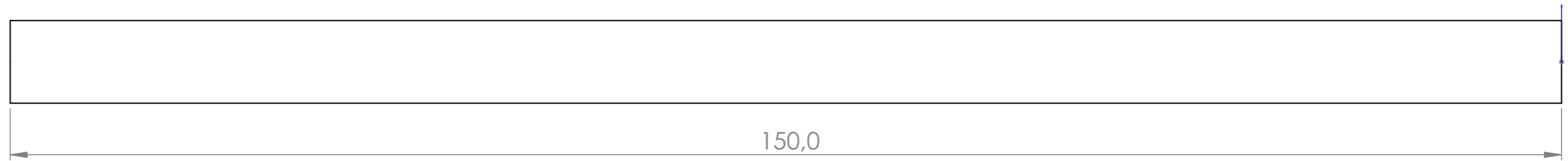
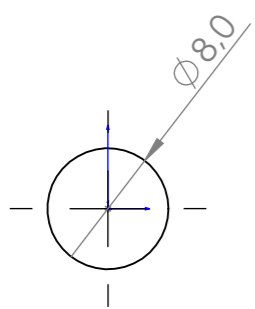
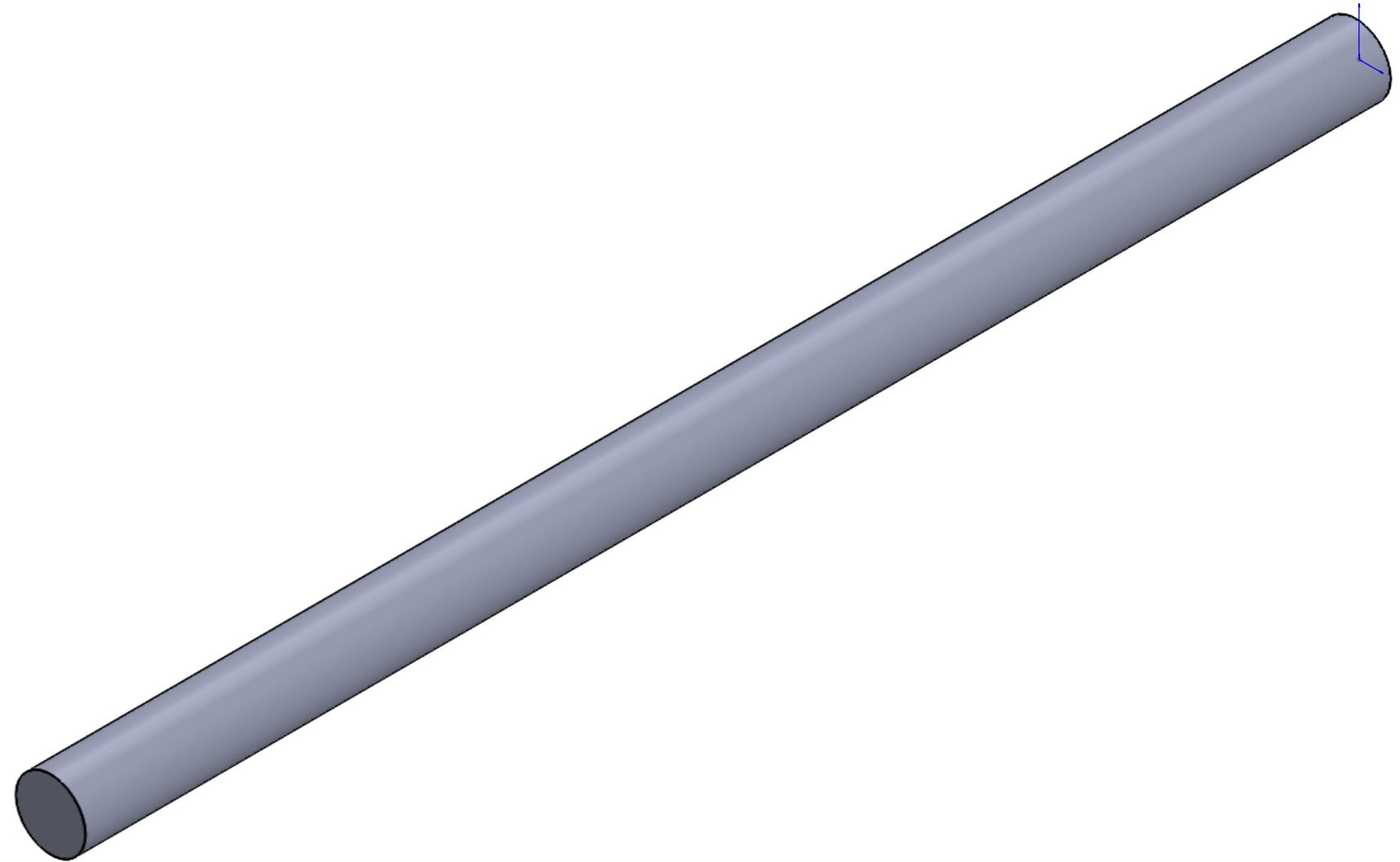


117

Tolerancia:		Peso:		Materiales:		aluminio	
± 0.1							
	Fecha	Nombre		Denominación:		Escala 1:2	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		base aluminio P		A3	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores					
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza					
				N° de Dibujo		01-01	
				Sustituye a:			

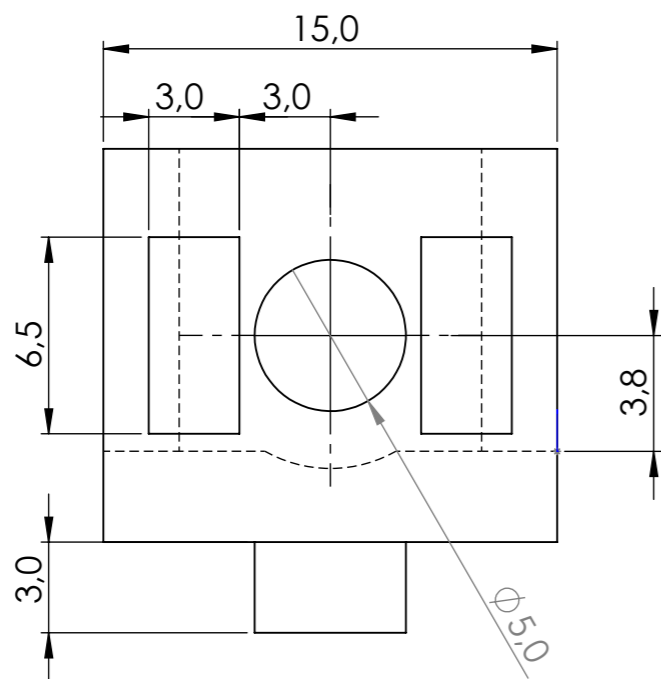
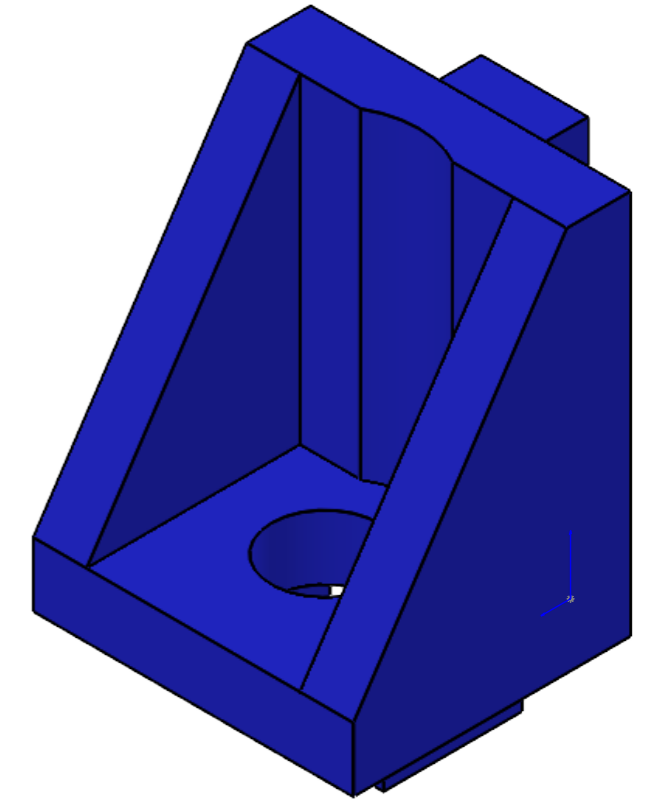
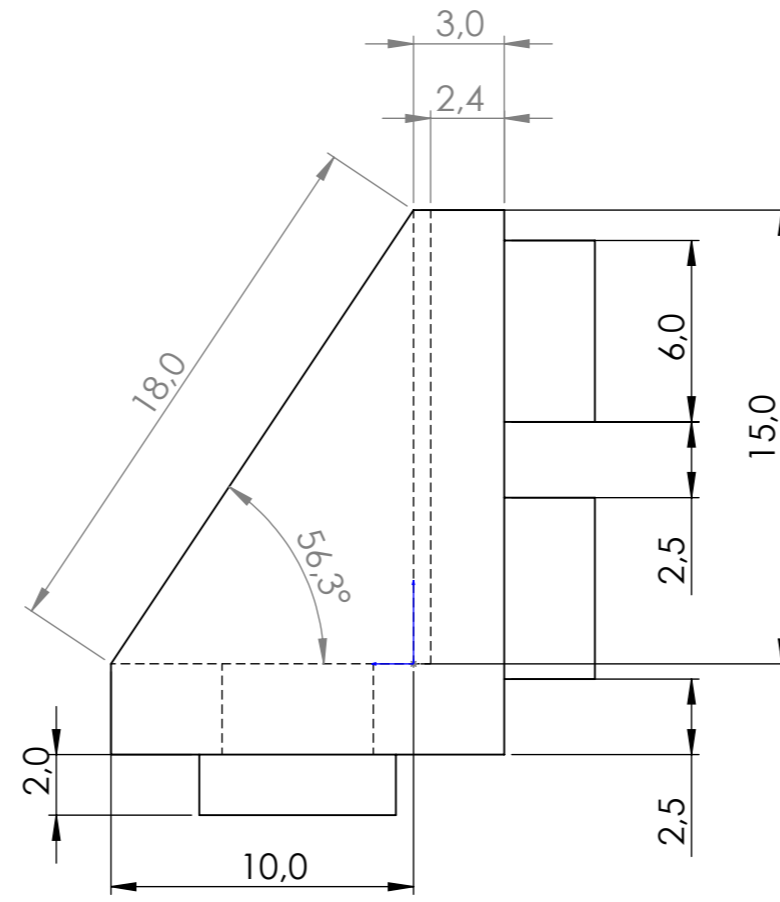
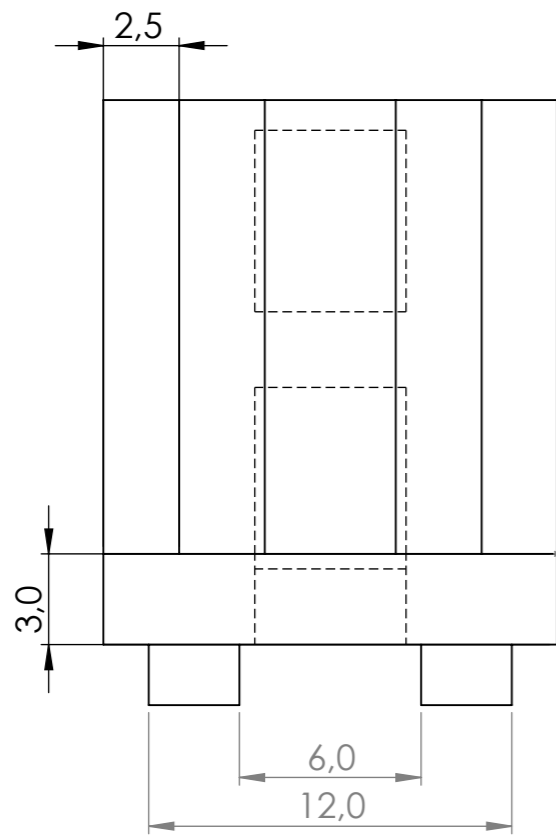


Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1					
	Fecha	Nombre	Denominación:		Escala 1:4
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza	base aluminio B		A3
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
			N° de Dibujo	01-02	
			Sustituye a:		

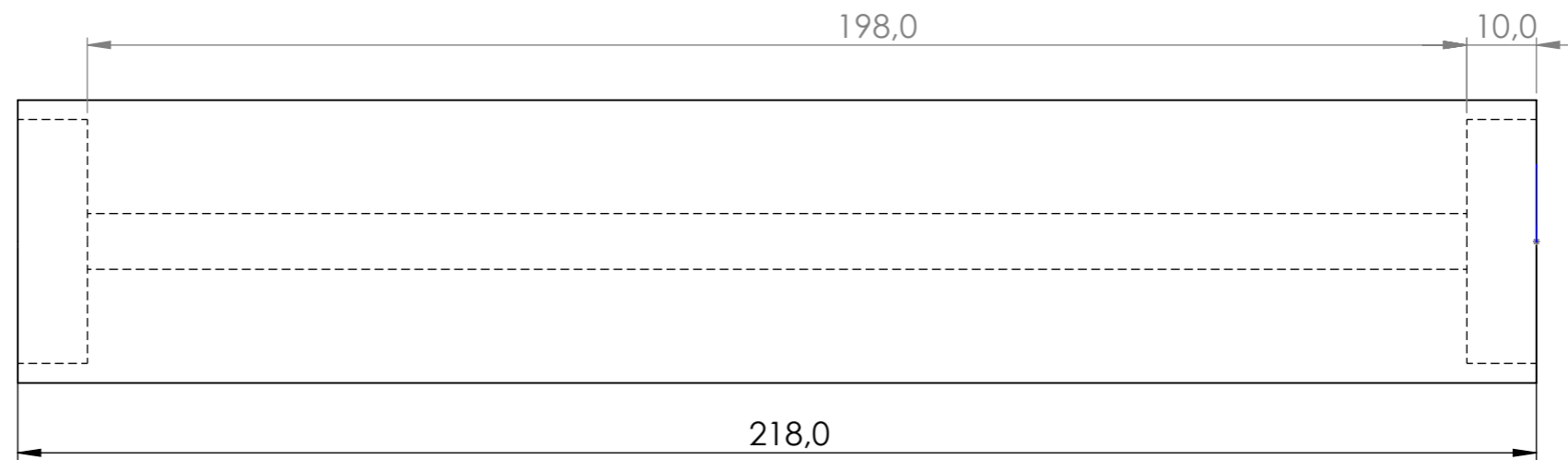
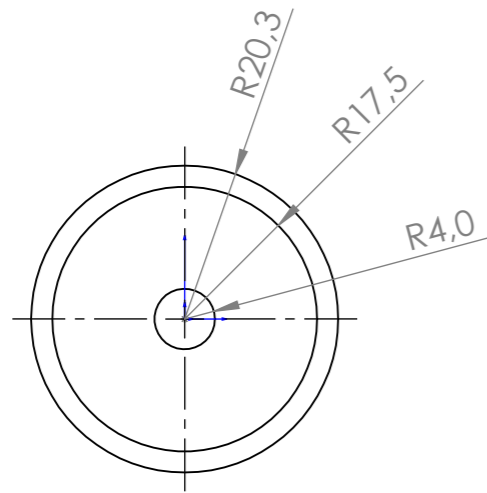
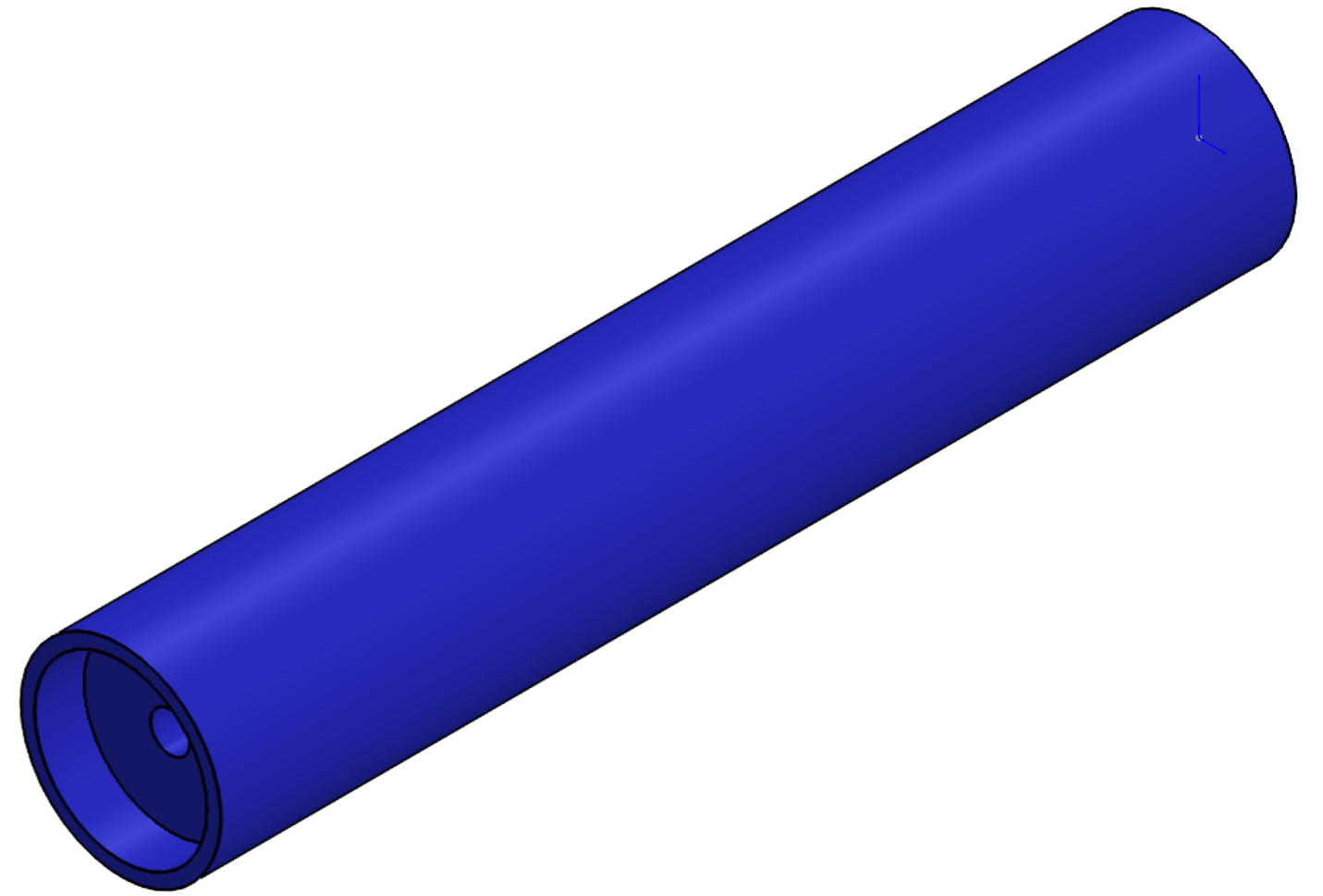


119



Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				acero inoxidable	
	Fecha	Nombre		Denominación:	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		eje de movimiento	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
Espol				N° de Dibujo	01-03
				Sustituye a:	

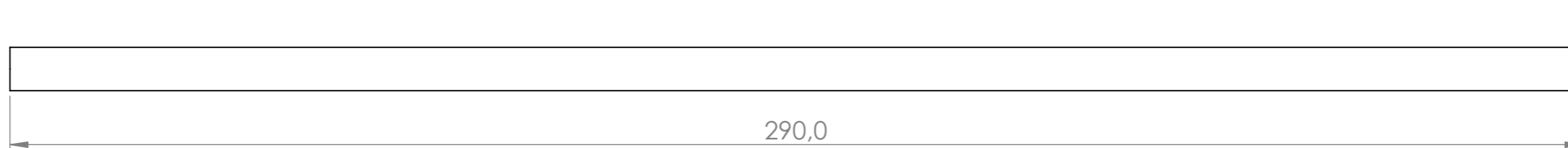
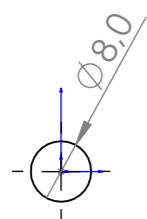
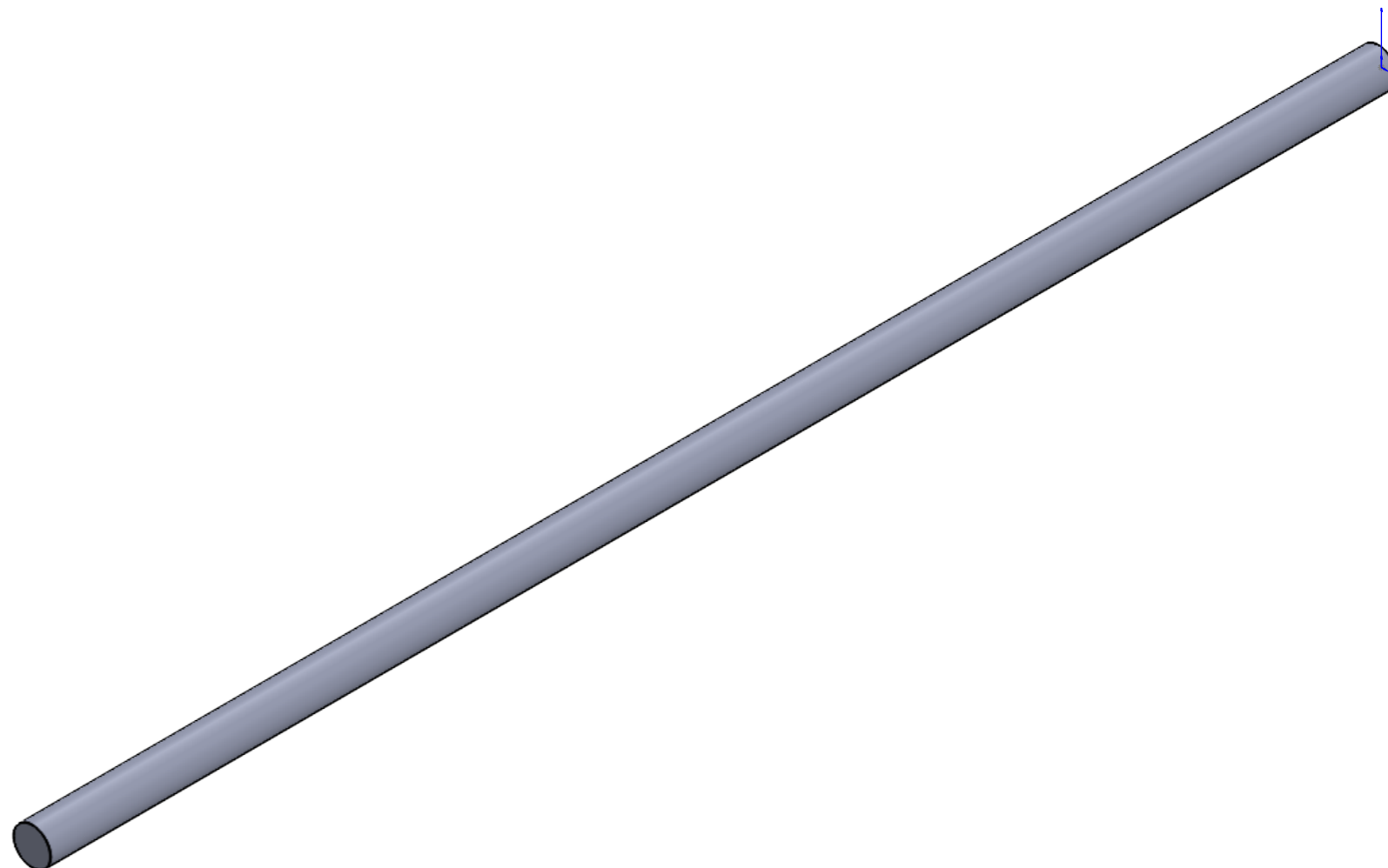


Tolerancia: ± 0.1		Peso:		Materiales: pla	
Fecha		Nombre		Denominación:	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		ángulo sujeción doble	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
Espol				N° de Dibujo 01-05	
Sustituye a:				Escala 4:1 A3	



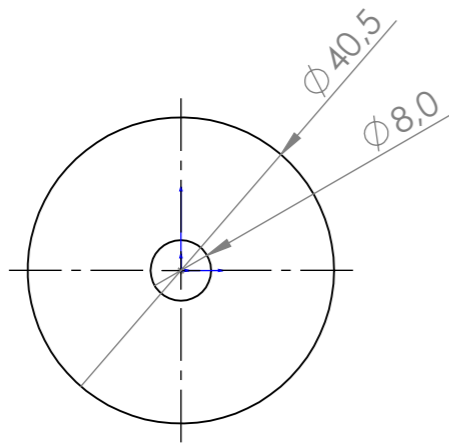
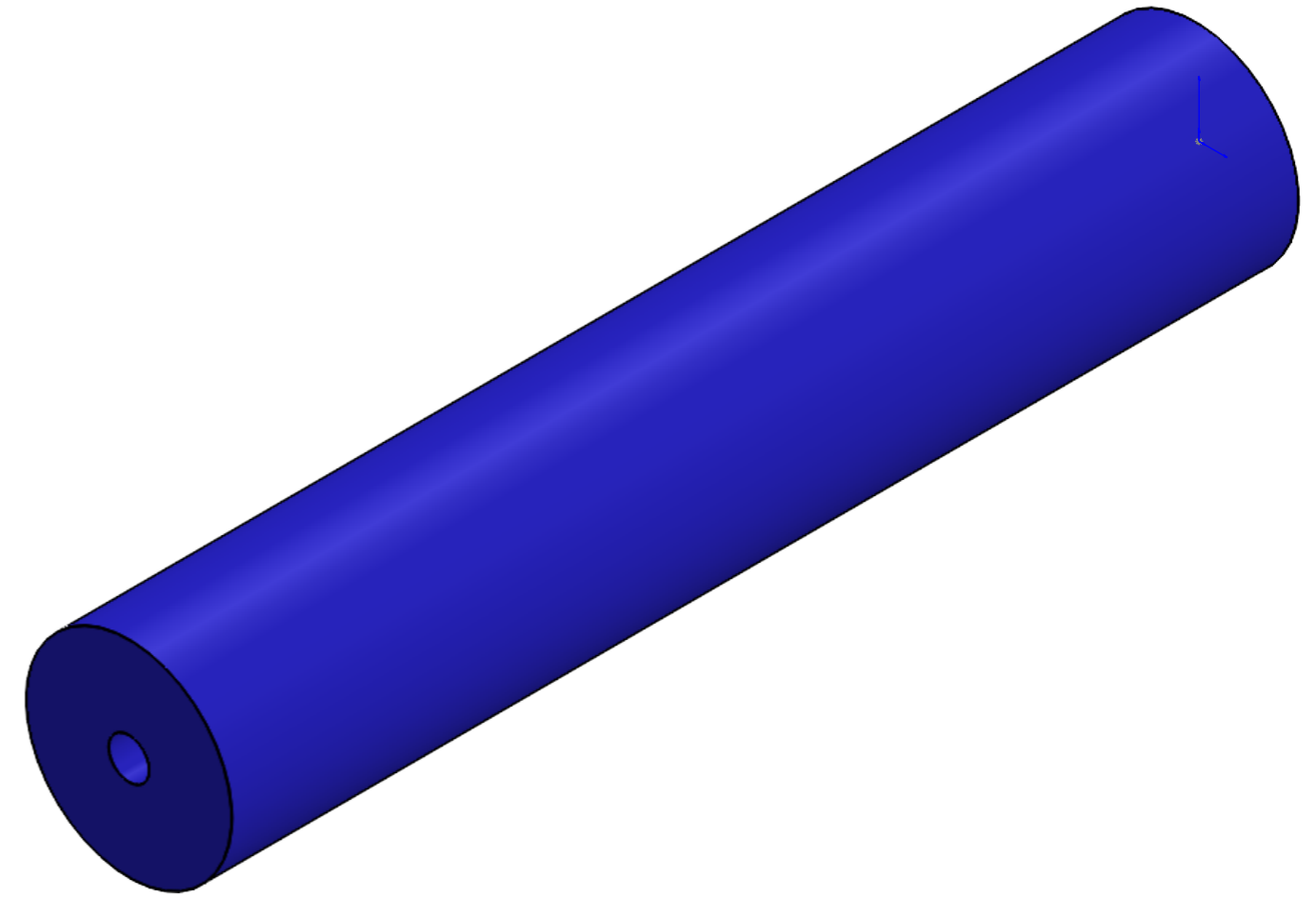
121



Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				PVC/PLA	
	Fecha	Nombre		Denominación:	Escala 1:1
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		cilindro de movimiento	A3
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
				N° de Dibujo	01-06
				Sustituye a:	

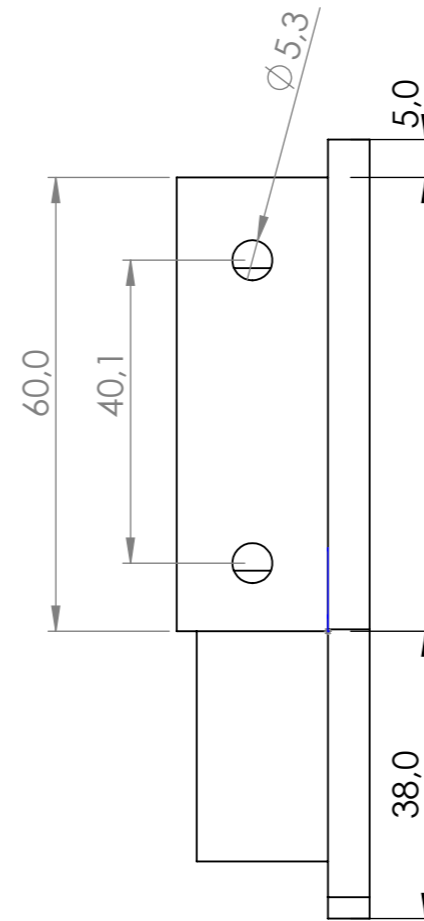
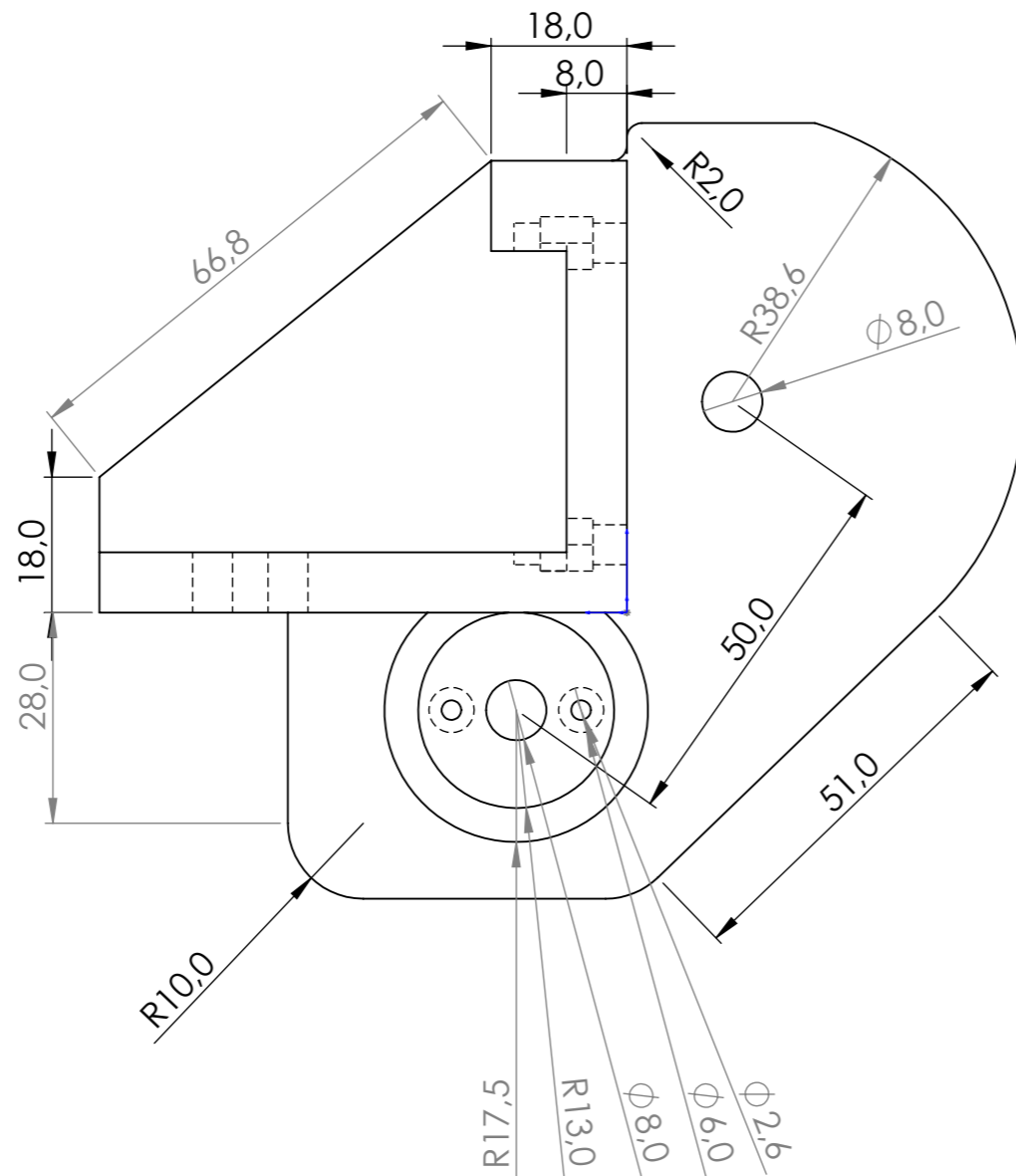
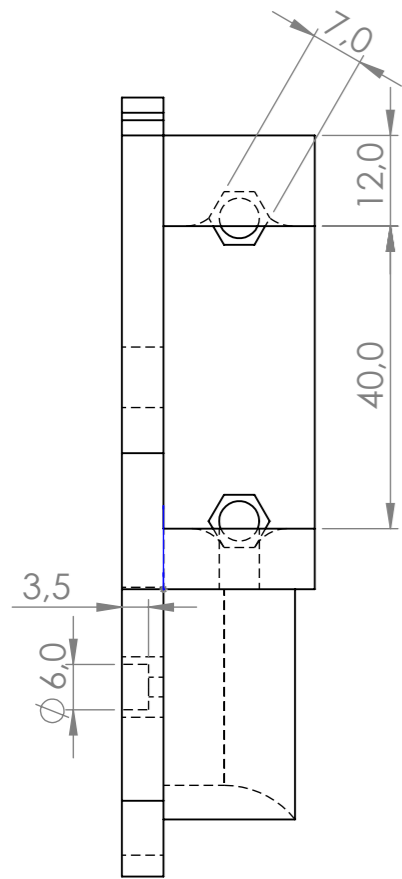
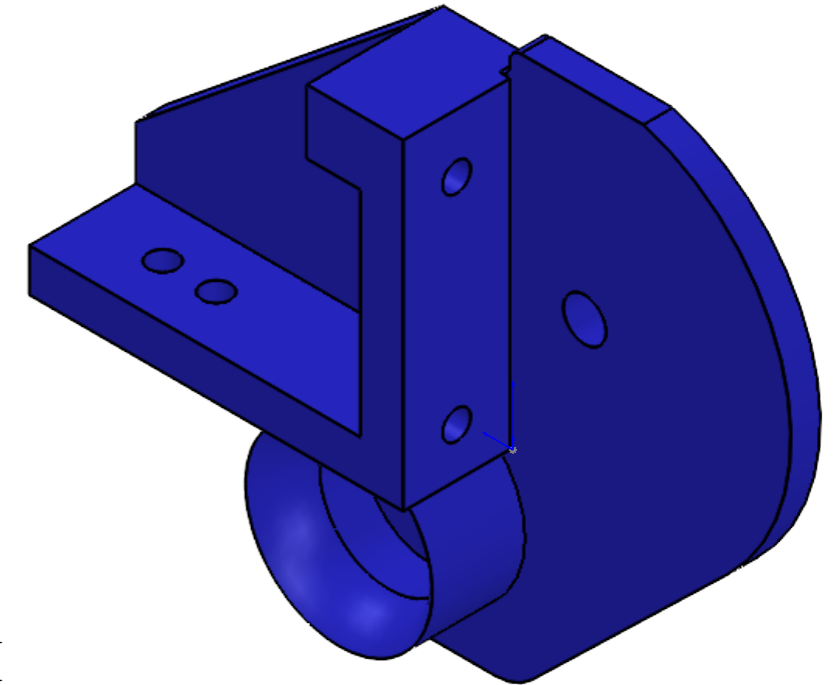
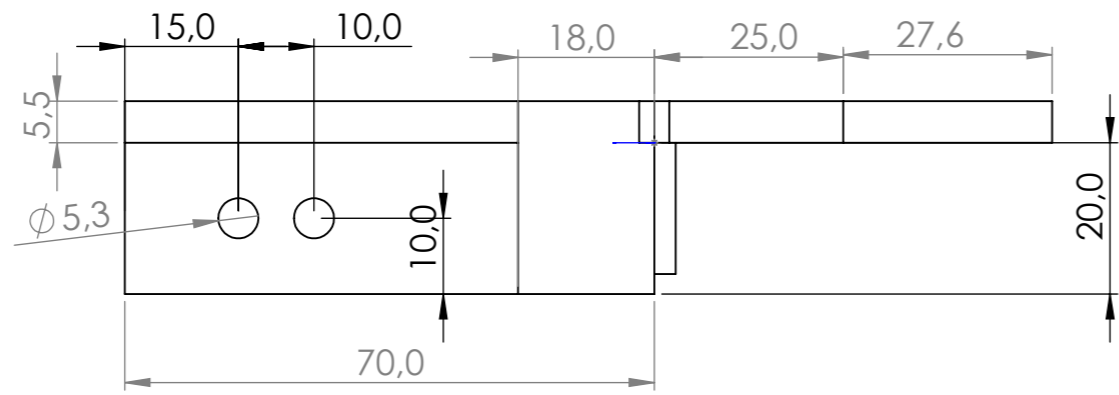



122

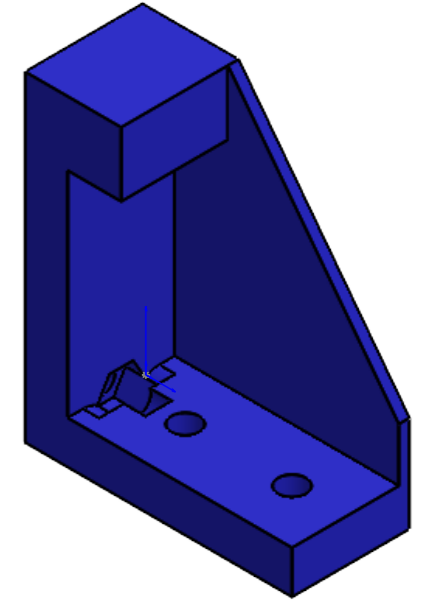
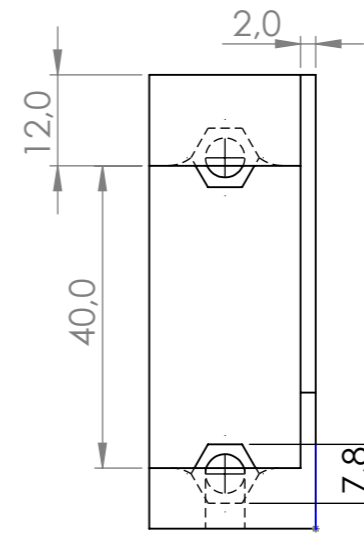
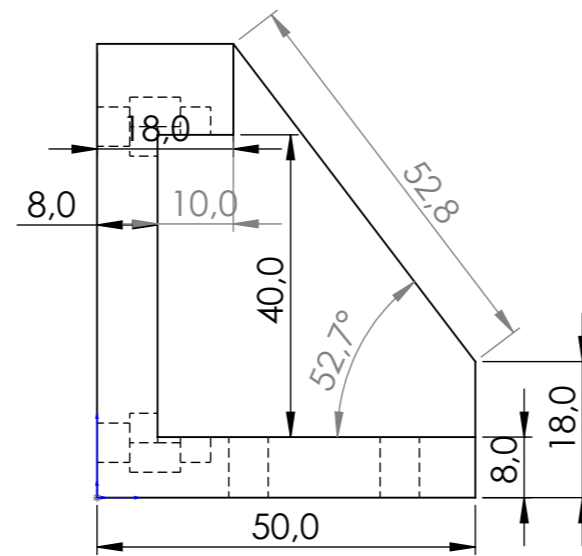
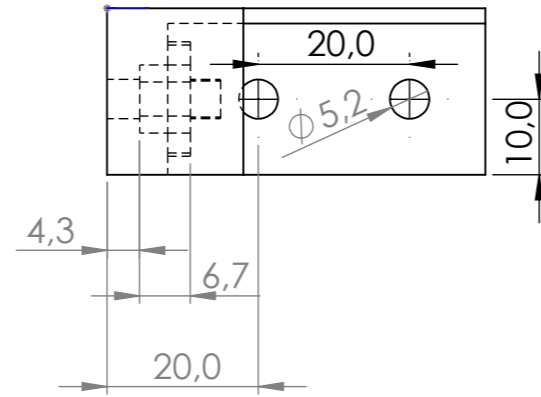
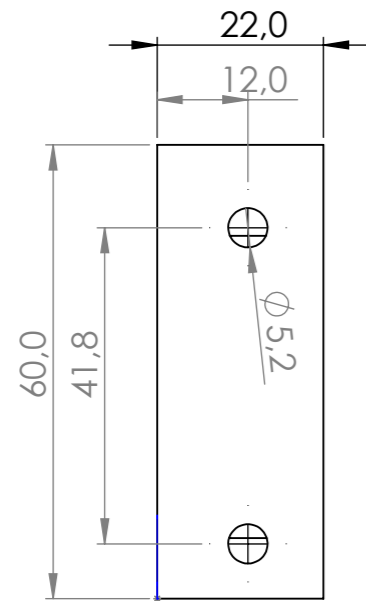
Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				acero inoxidable	
	Fecha	Nombre		Denominación:	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		eje motriz	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
Espol		N° de Dibujo		Escala 1:1	
		01-07		A3	
		Sustituye a:			



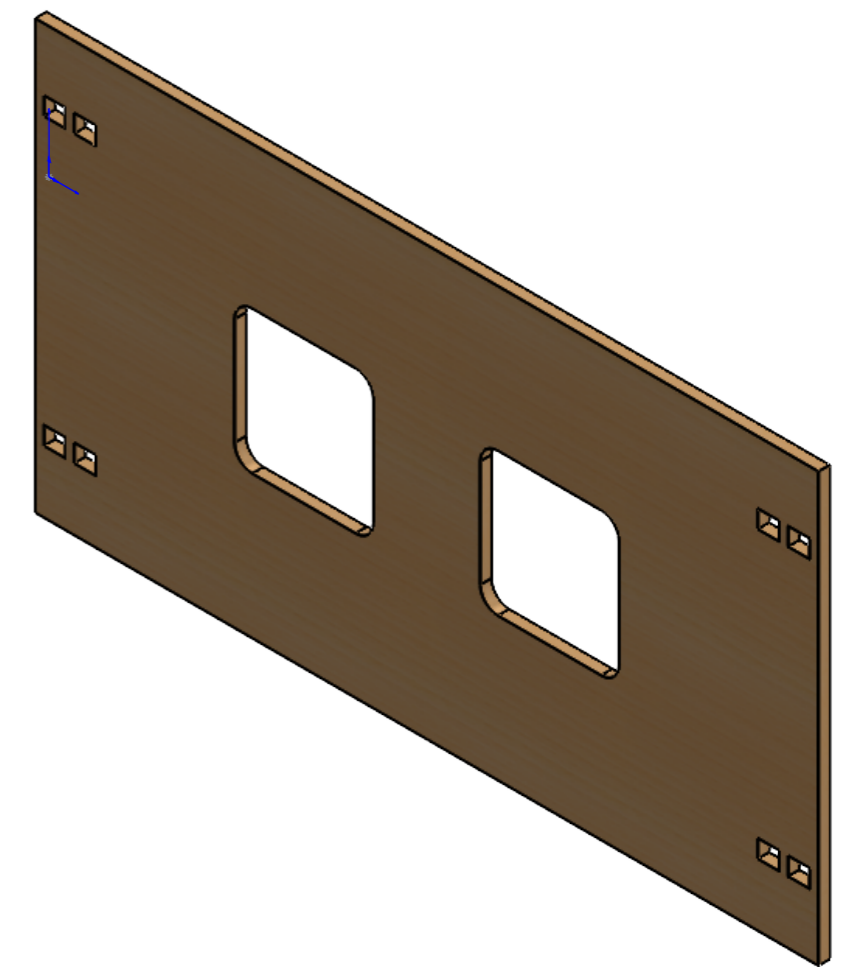
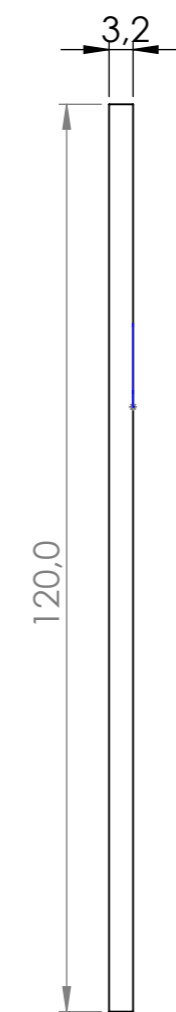
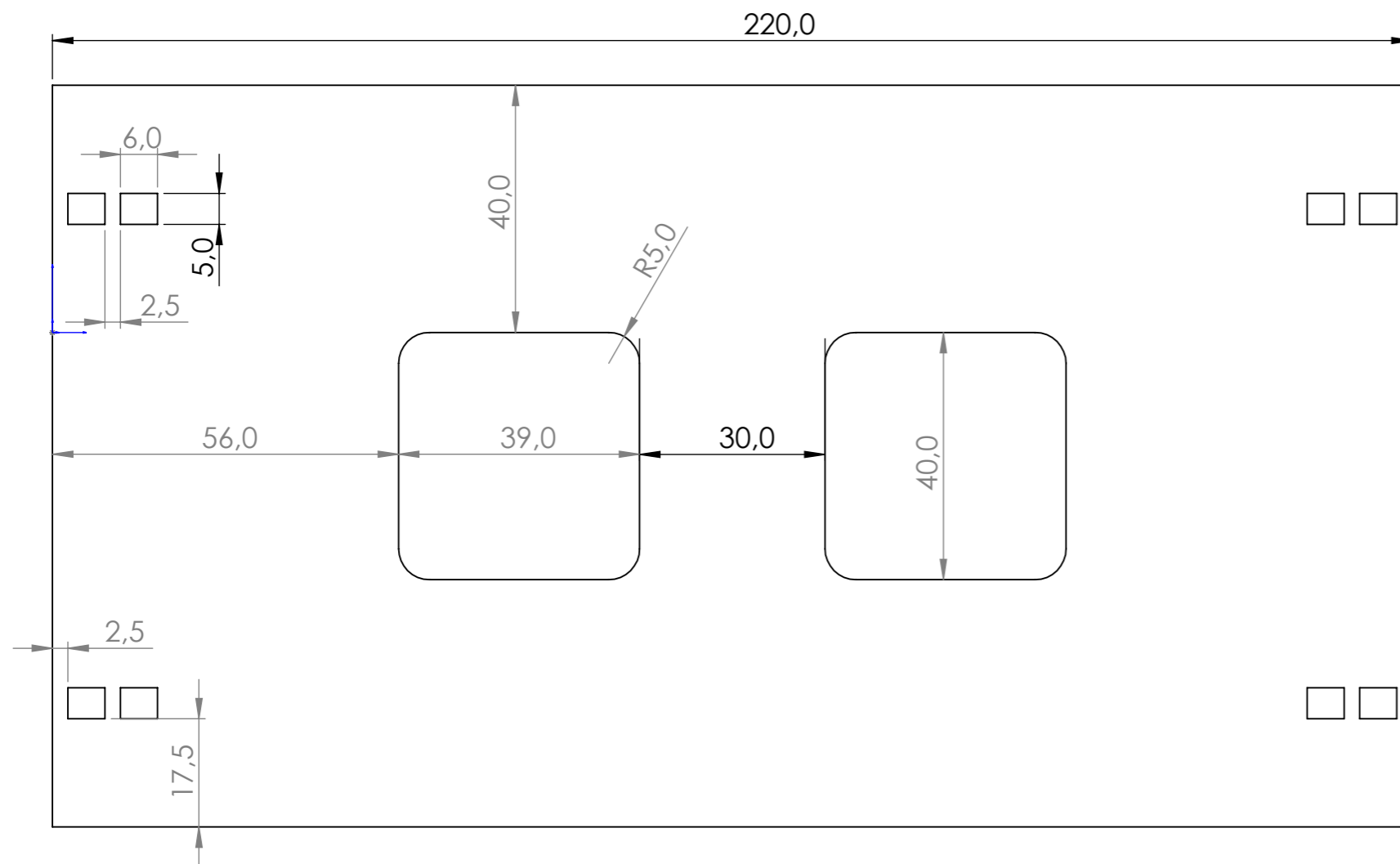
Tolerancia:		Peso:		Materiales:		PVC/PLA	
± 0.1							
	Fecha	Nombre		Denominación:		Escala 1:1	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		cilindro motriz		A3	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores					
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza					
				N° de Dibujo		01-08	
				Sustituye a:			




Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				pla	
	Fecha	Nombre		Denominación:	Escala 1:1
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		empotre transmisión	A3
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
				N° de Dibujo	01-09
				Sustituye a:	

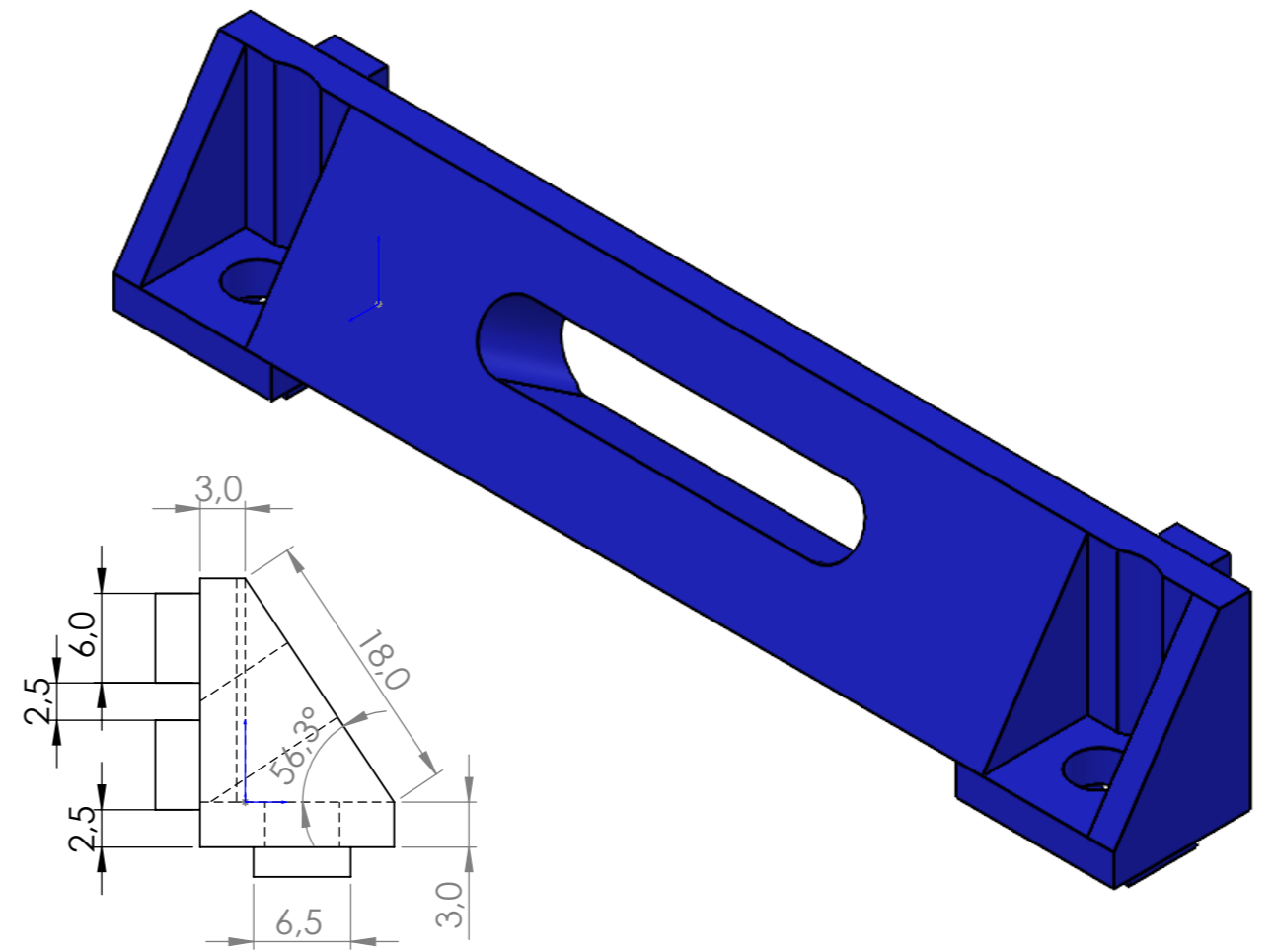
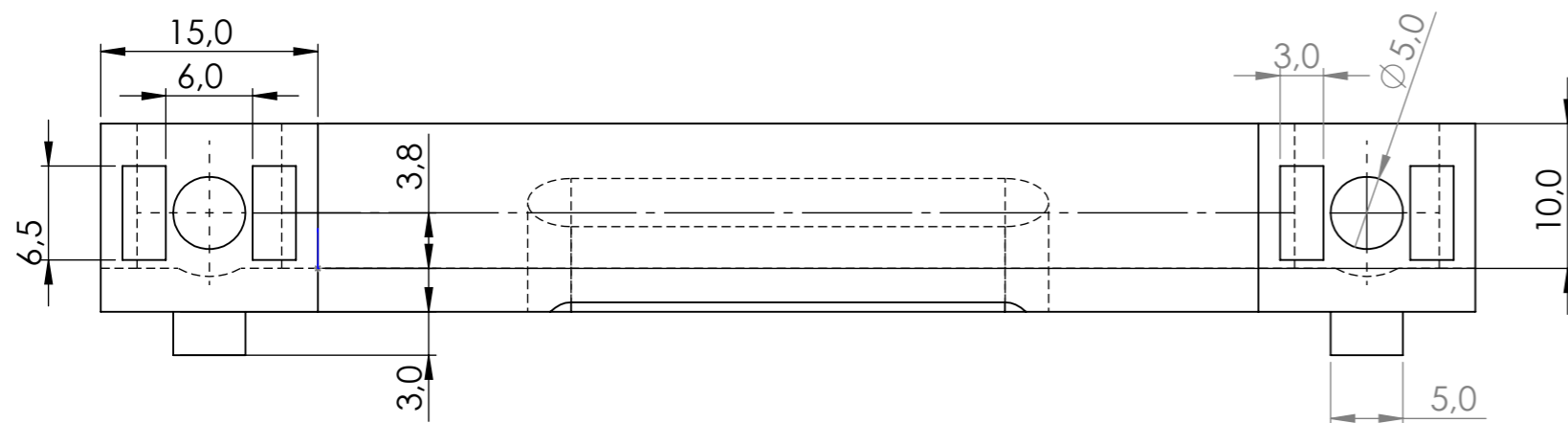
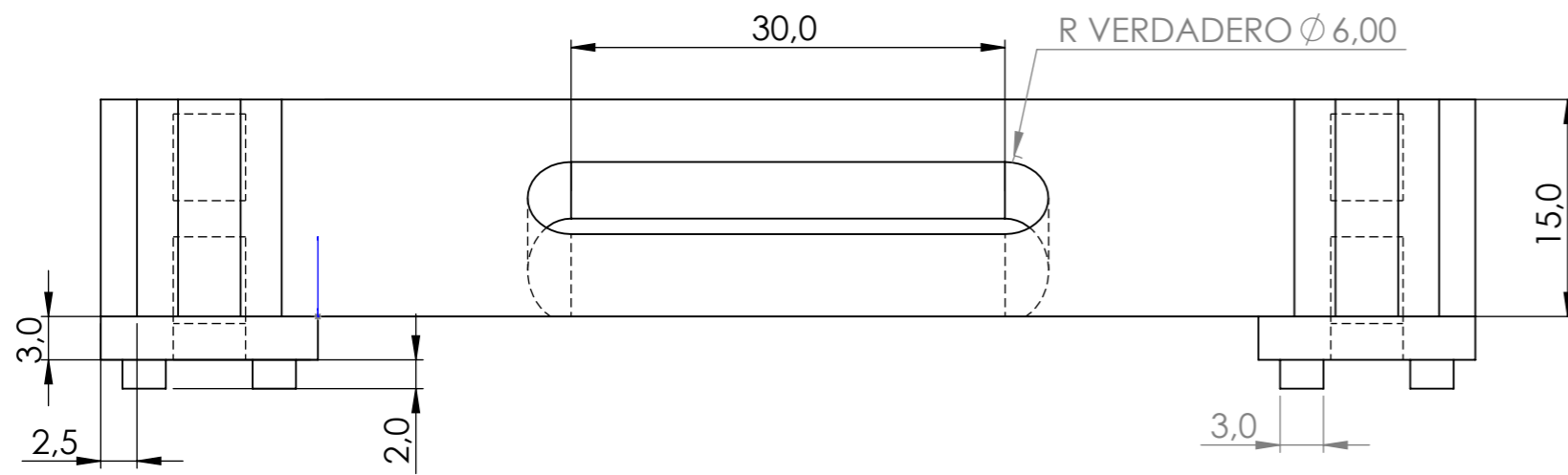




Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				pla	
	Fecha	Nombre		Denominación:	Escala
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza			1:1
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			A3
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
				N° de Dibujo	01-10
				Sustituye a:	

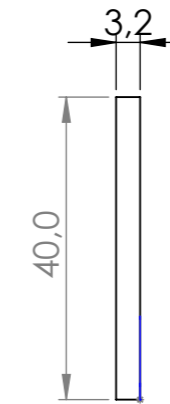
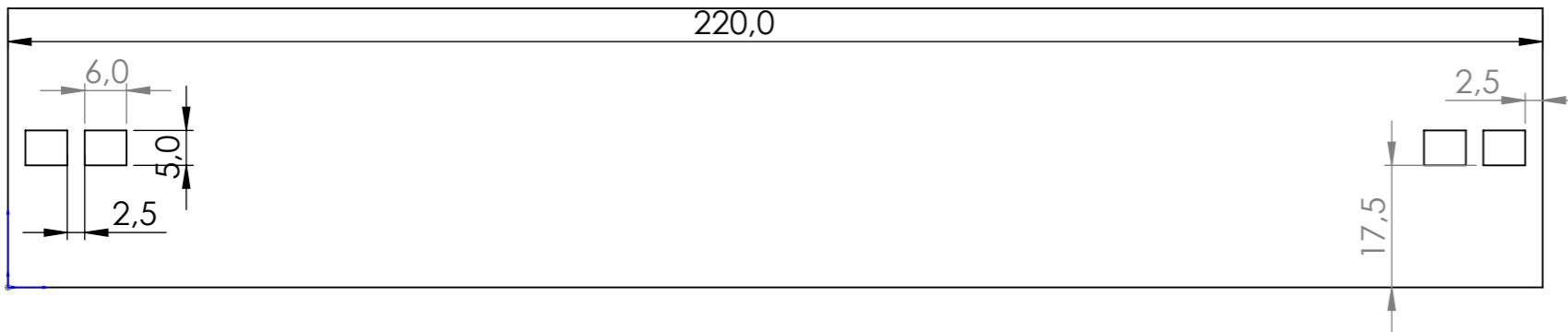
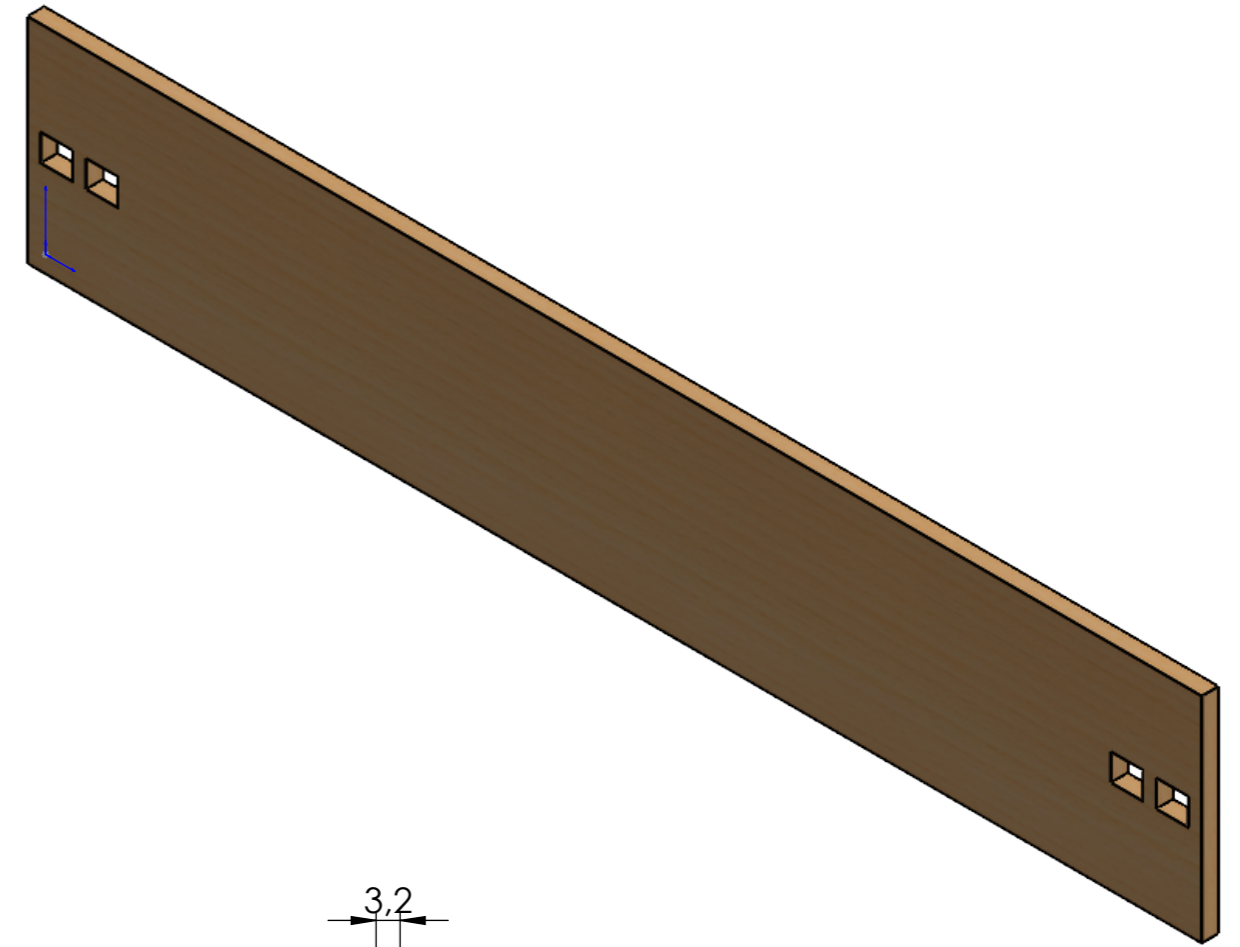


126

Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				mdf	
	Fecha	Nombre		Denominación:	Escala 1:1
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		soporte central de banda	A3
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
				N° de Dibujo	01-14
				Sustituye a:	

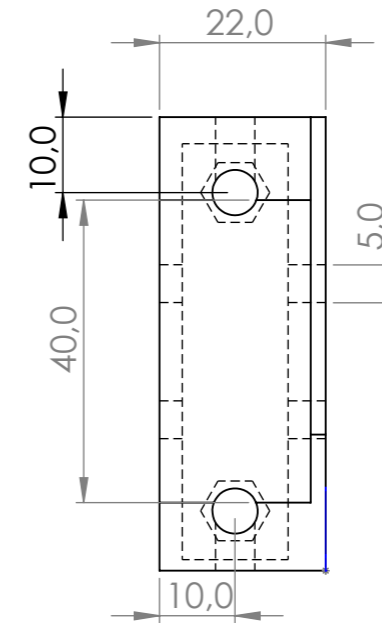
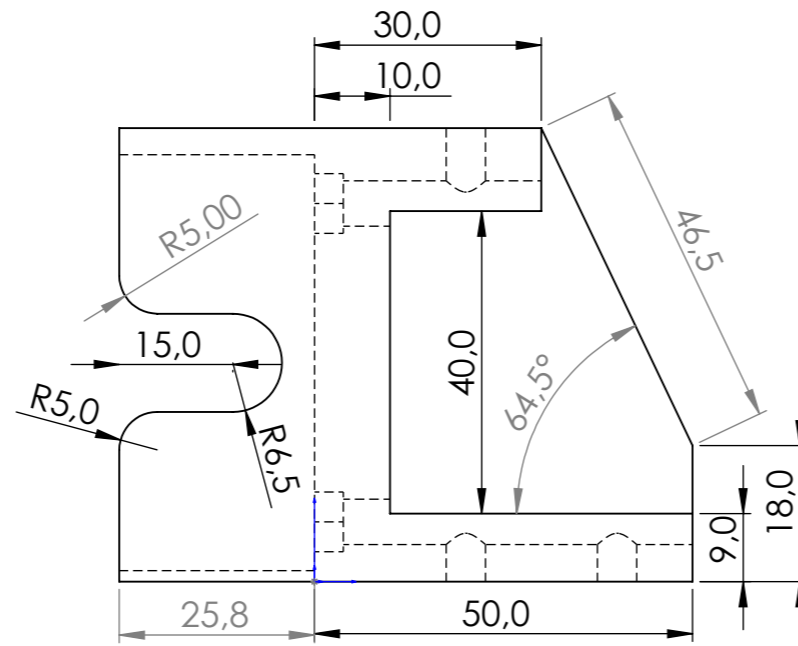
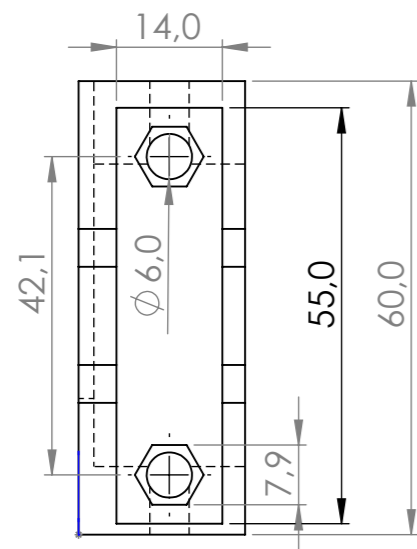
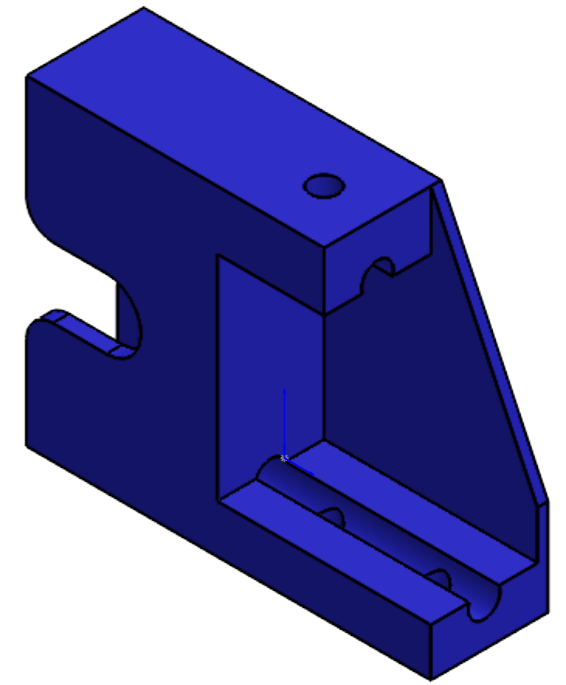
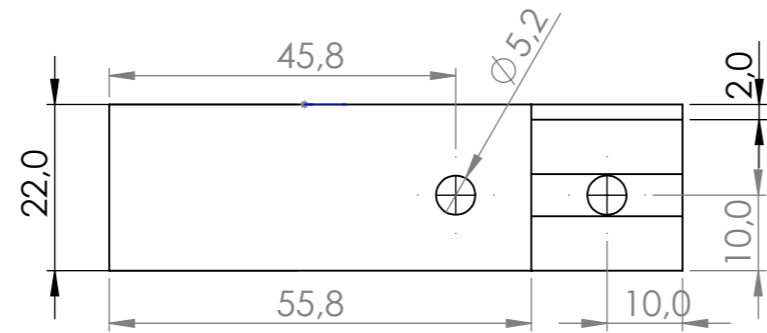


Tolerancia: ± 0.1		Peso:		Materiales: pla	
Fecha		Nombre		Denominación:	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		ángulo de sujeción	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
				N° de Dibujo 01-15	
Sustituye a:					

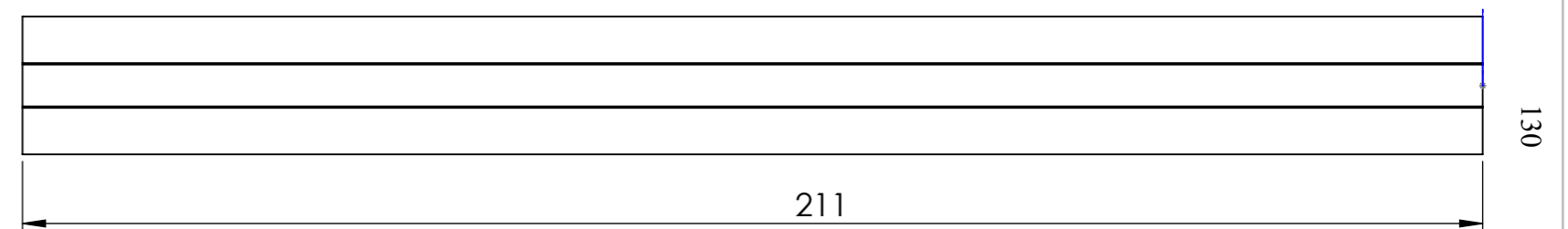
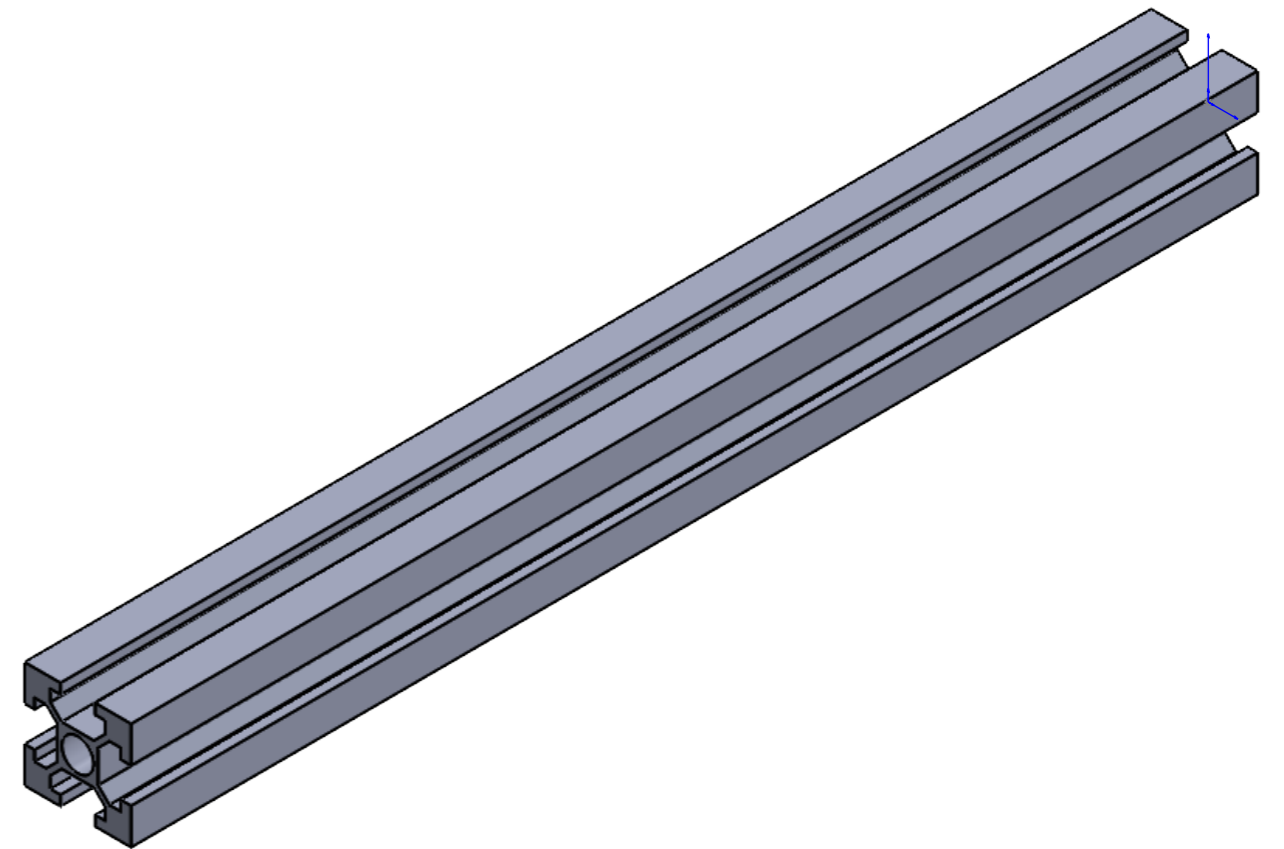
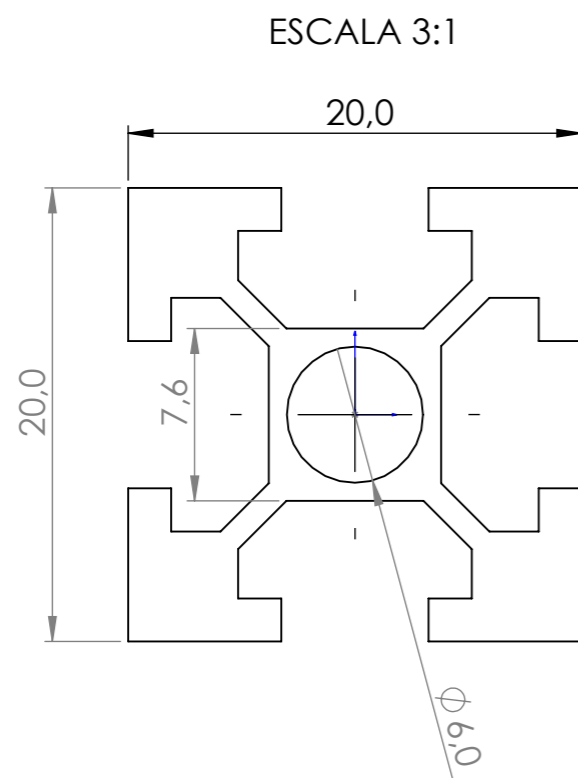



128

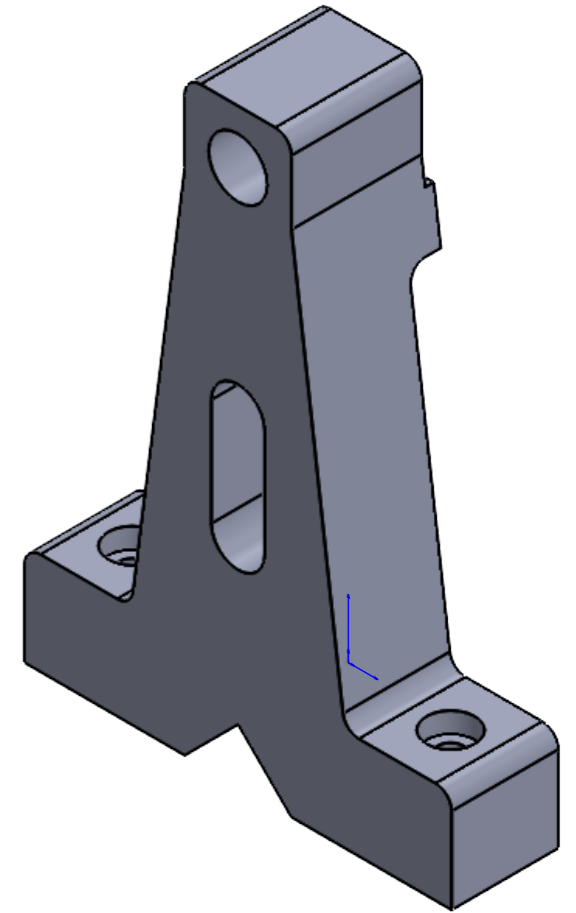
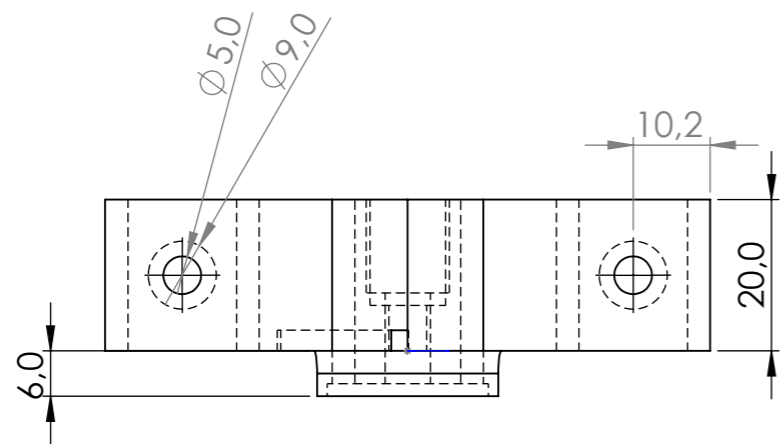
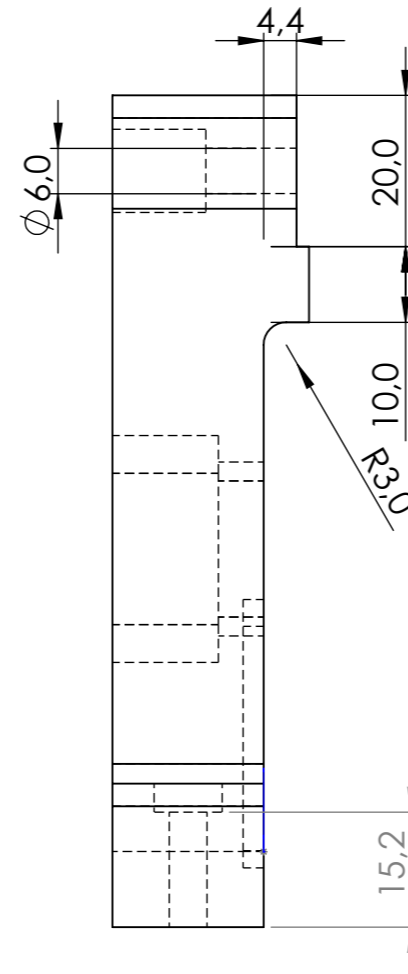
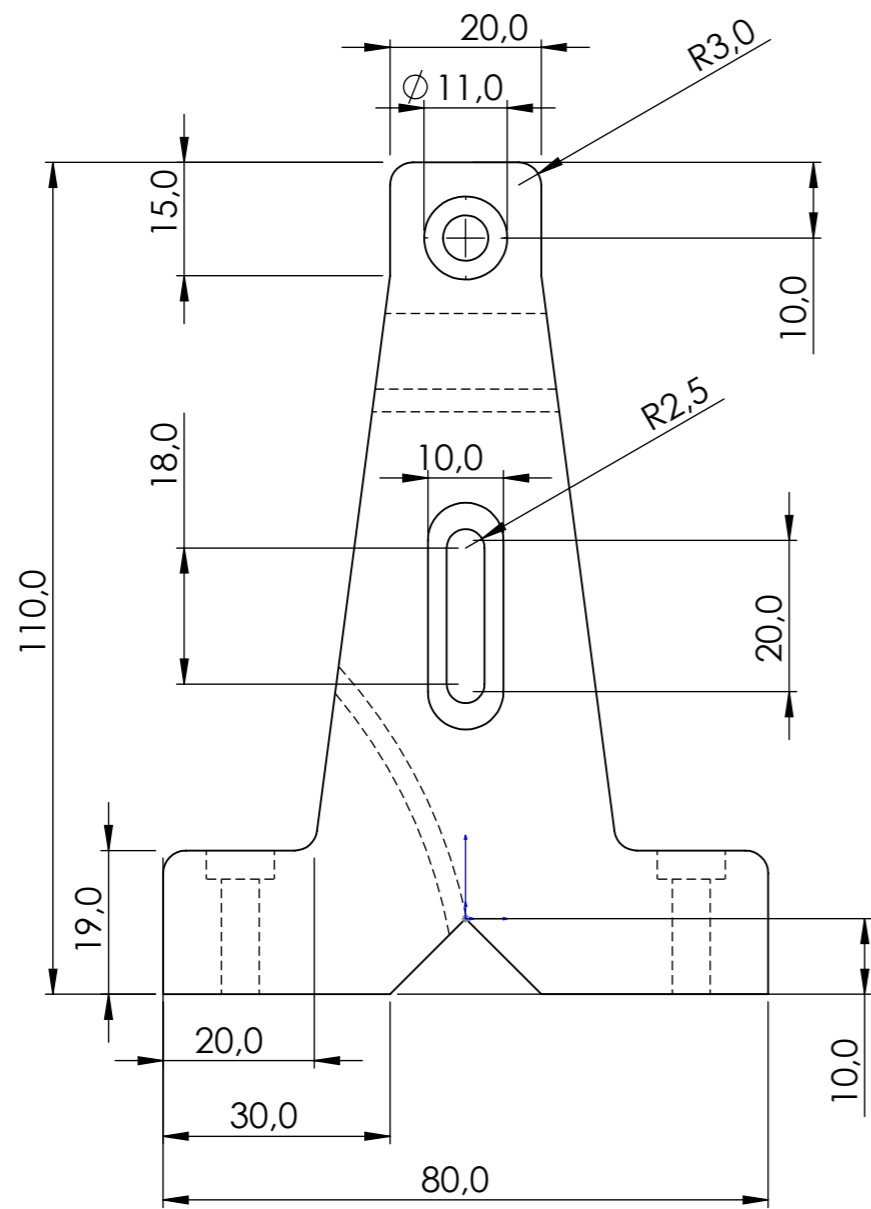
Tolerancia:		Peso:		Materiales:		
± 0.1				mdf		
	Fecha	Nombre		Denominación:	Escala	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza			soporte extremo de banda	1:1
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores				A3
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza				
				N° de Dibujo		
				01-16		
Sustituye a:						





Tolerancia:		Peso:		Materiales:	
± 0.1				pla	
	Fecha	Nombre		Denominación:	Escala
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza			1:1
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores			A3
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza			
				N° de Dibujo	01-17
Sustituye a:					

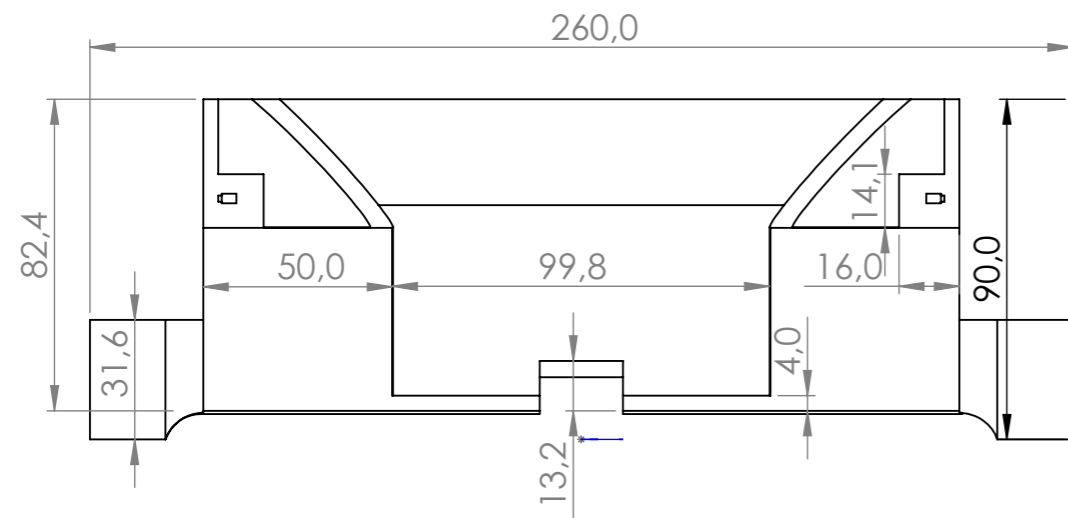
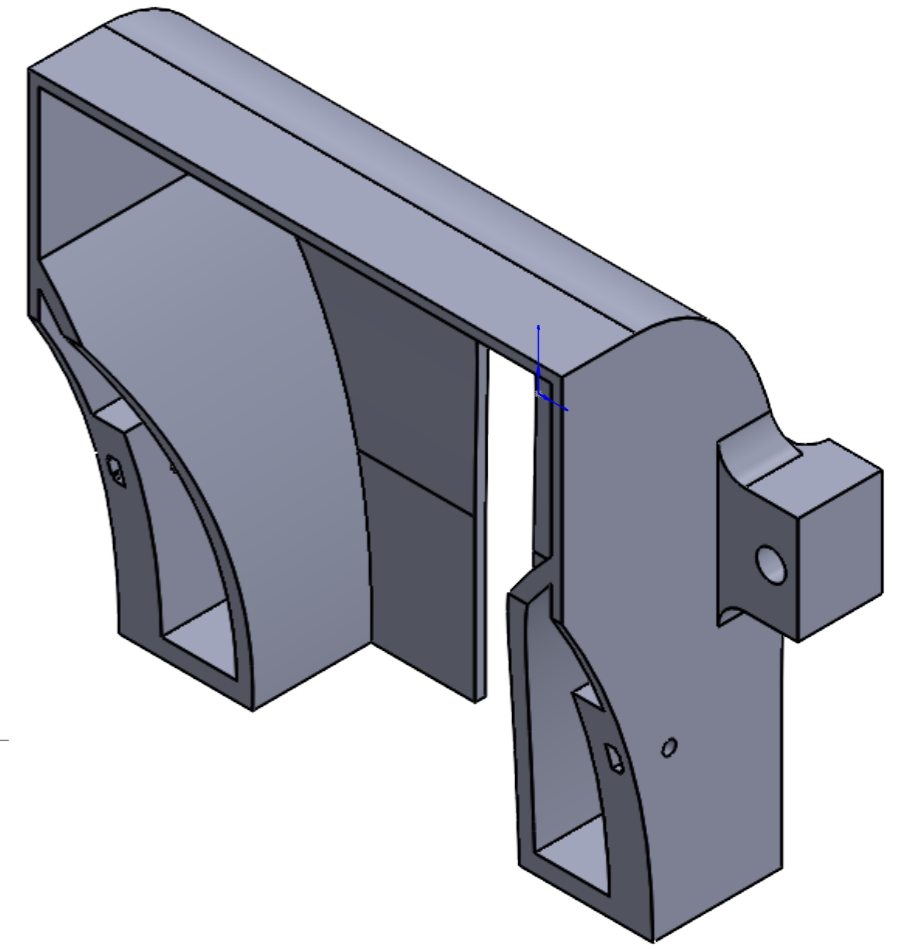
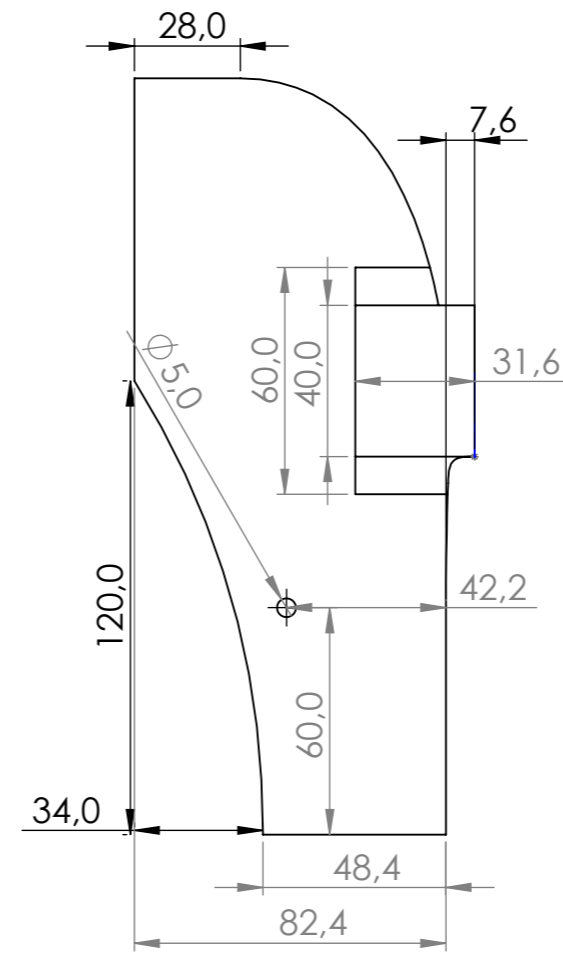
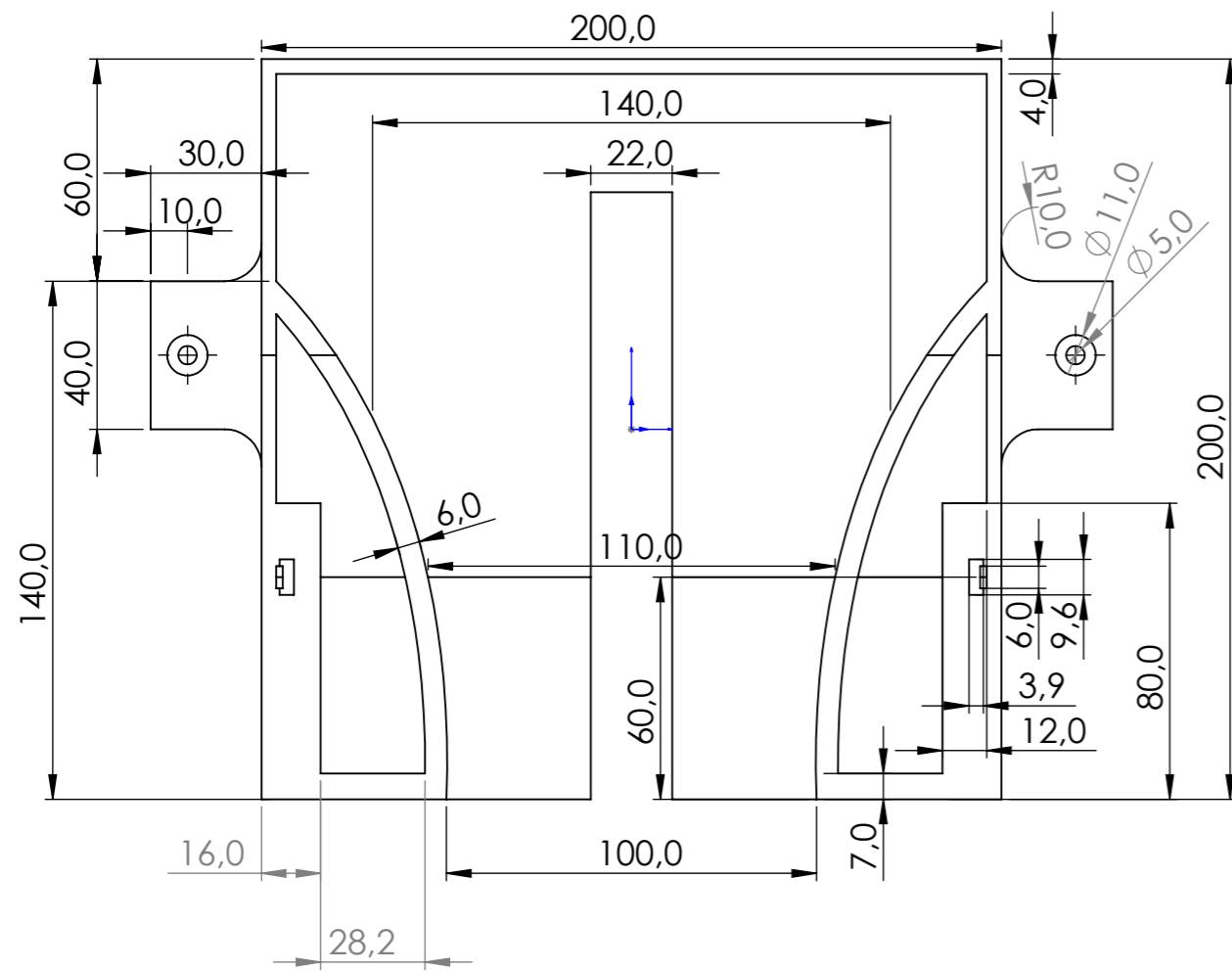


Tolerancia:		Peso:		Materiales:		aluminio	
± 0.1							
	Fecha	Nombre		Denominación:		Escala 1:1	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		base aluminio camara		A3	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores					
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza					
				N° de Dibujo		01-19	
				Sustituye a:			



131

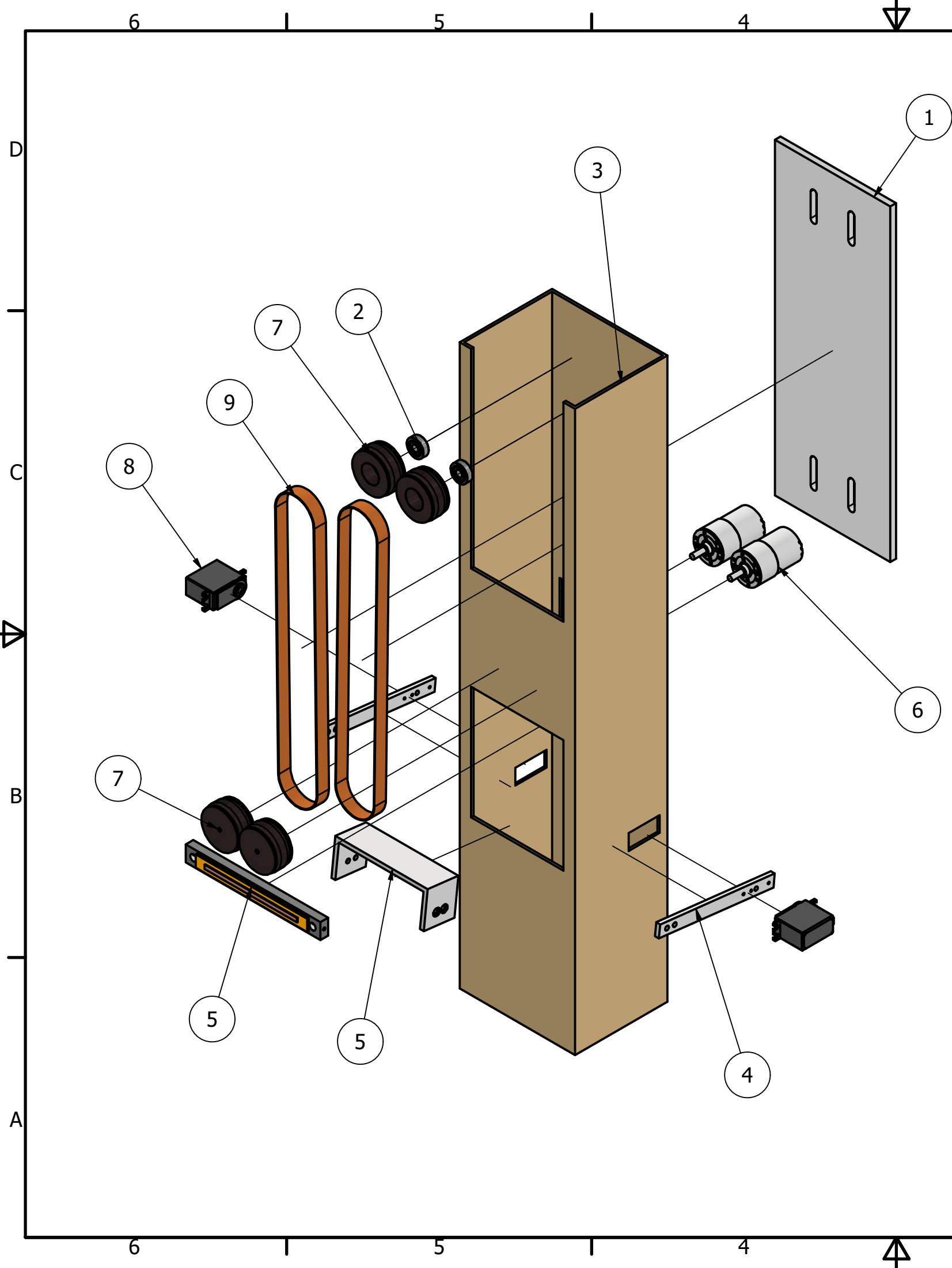
Tolerancia:		Peso:		Materiales:		pla	
± 0.1							
	Fecha	Nombre		Denominación:		Escala 1:1	
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		apoyo base camara		A3	
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores					
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza					
				N° de Dibujo		01-20	
				Sustituye a:			




Tolerancia: ± 0.1		Peso:	Materiales: pla	
Fecha		Nombre		Denominación:
Dib.	10/01/2026	Angelo Espinoza		apriete
Rev.	10/01/2026	Cristhian Flores		Escala 1:1
Aprob.	10/01/2026	Angelo Espinoza		A3
N° de Dibujo			01-21	
Sustituye a:				

espol

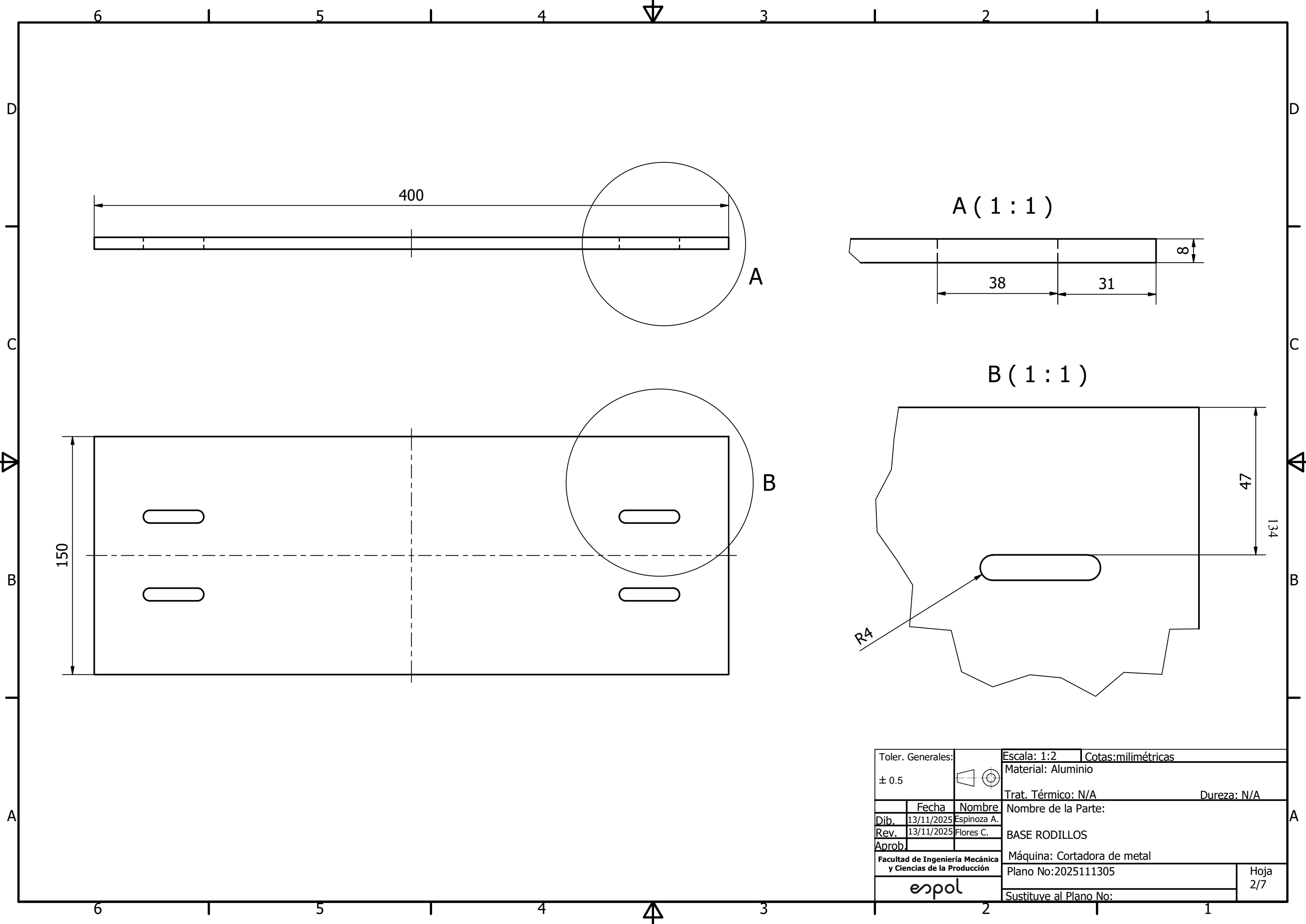


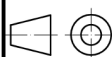



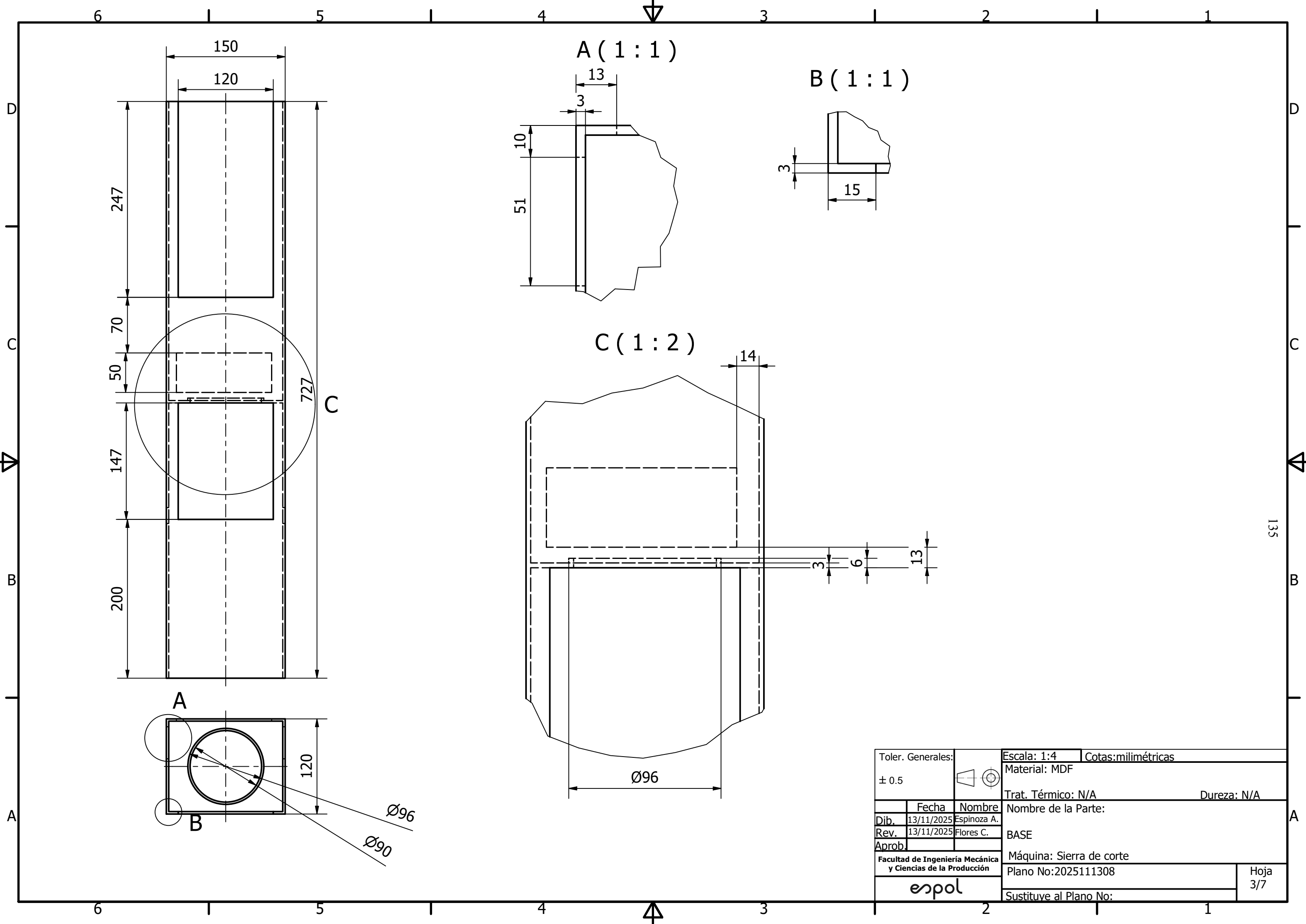
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	base rodillos	aluminio cortado
2	2	Ball Bearing 608 - 8x22x7mm	rodamientos
3	1	base	mdf
4	2	eslabon mordaza	pla
5	2	mordaza	pla recubierta de caucho y teflón
6	2	Motor Dc 12v Motorreductor Alto Torque 67rpm	STEP AP203
7	4	Rueda motriz	Pla
8	2	servo.MG995	STEP AP214
9	2	Banda de teflón	teflón
10	20	Tornillos 4x30mm	CABEZA PAN R/ESTRELLA
11	20	Pernos hexagonales M4	C/TUERCA C10 (SKT-24383/10)

Toler. Generales:		Escala: N/A		Cotas: N/A	
N/A		Material: N/A		Dureza: N/A	
Fecha		Nombre		Nombre de la Parte:	
Dib.	13/11/2025	Espinoza A.		BOM SELLADORA	
Rev.	13/11/2025	Flores C.		Máquina: N/A	
Aprob.				Plano No: 2025111309	
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción				Hoja 1/7	
				Sustituye al Plano No:	

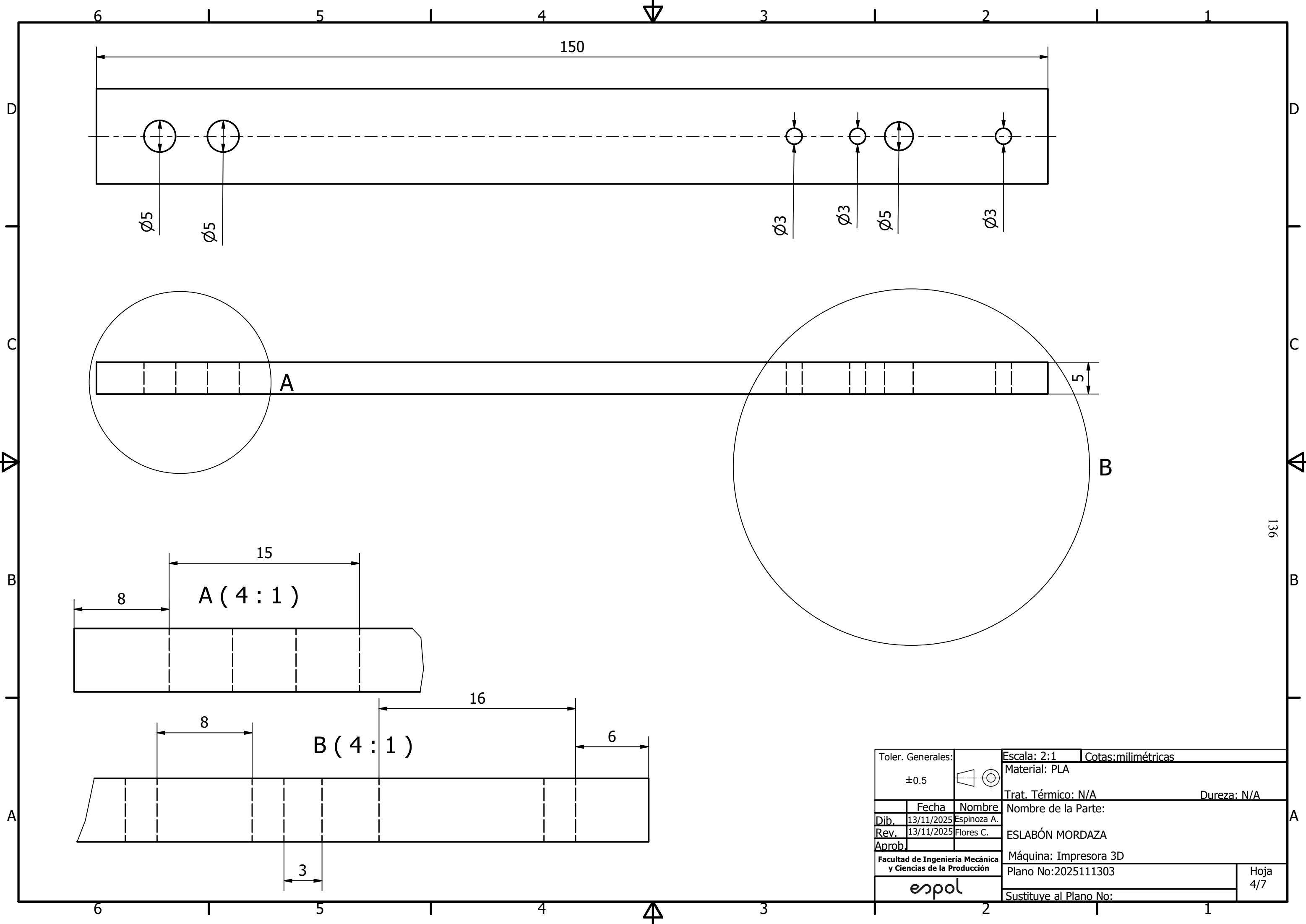
133



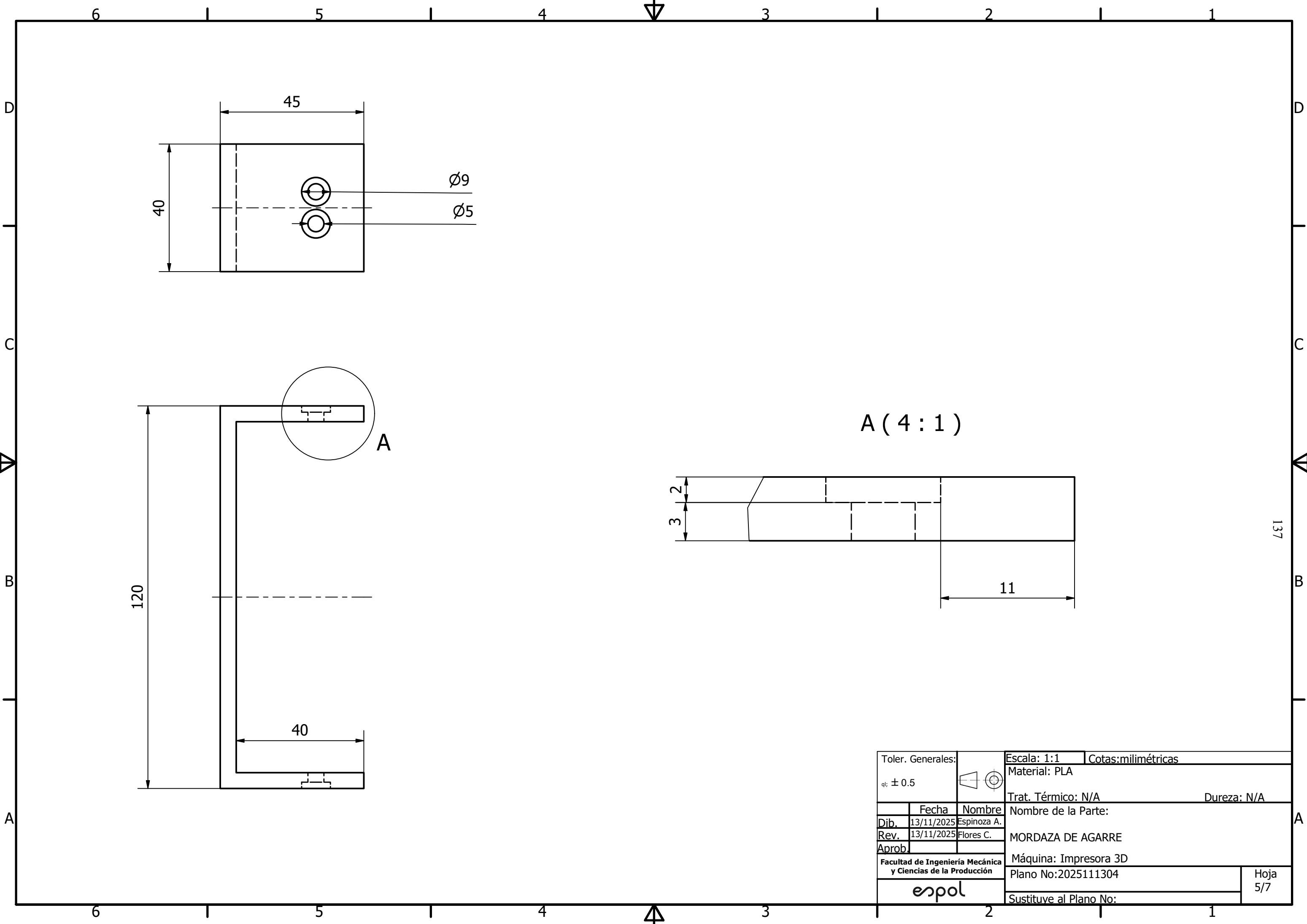
Toler. Generales:		Escala: 1:2		Cotas: milimétricas	
± 0.5				Material: Aluminio	
		Trat. Térmico: N/A		Dureza: N/A	
	Fecha	Nombre de la Parte:			
Dib.	13/11/2025	Espinoza A.			
Rev.	13/11/2025	Flores C.			
Aprob.		BASE RODILLOS			
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción		Máquina: Cortadora de metal			
		Plano No: 2025111305			Hoja
		Sustituye al Plano No:			2/7



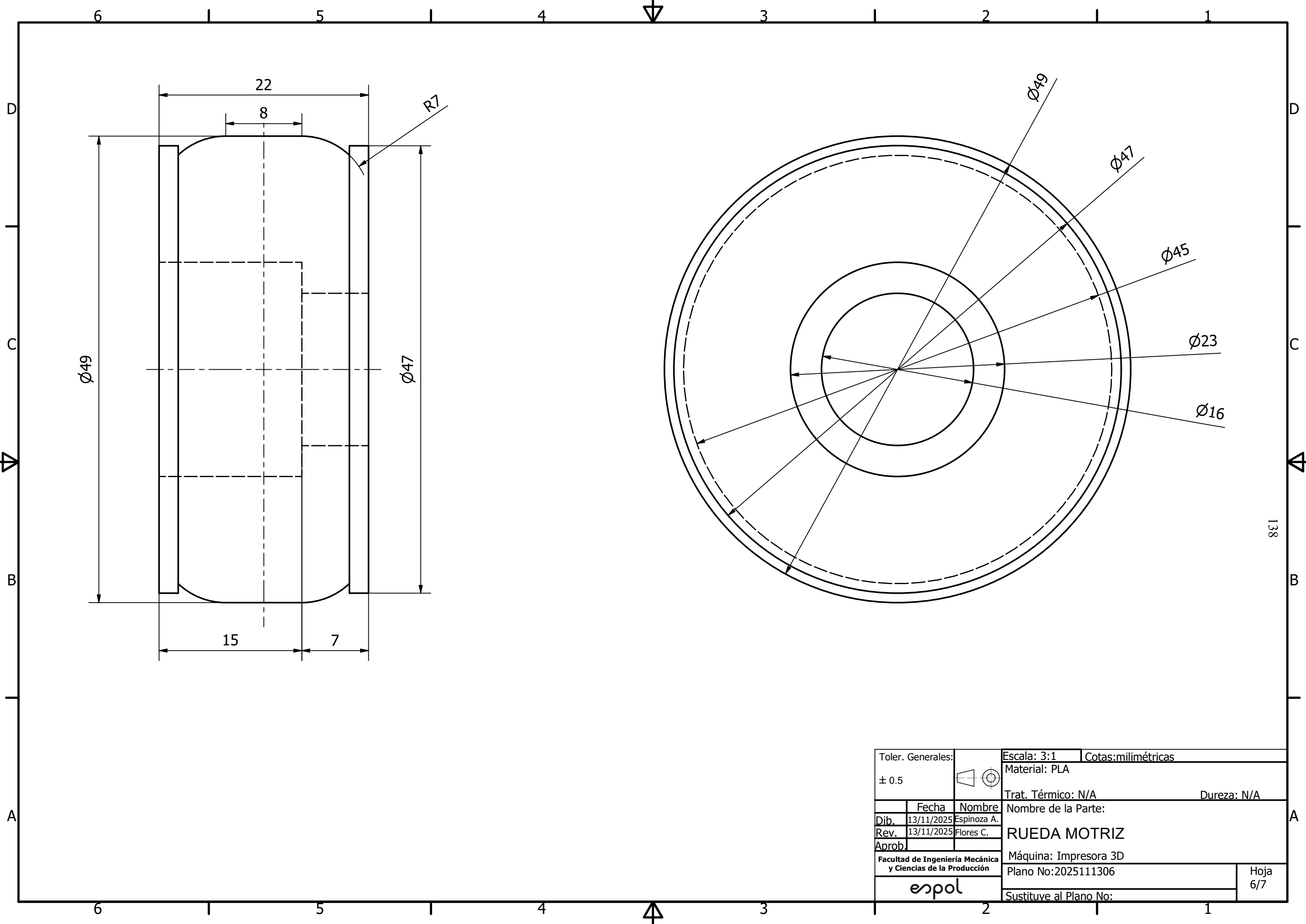
Toler. Generales:		Escala: 1:4		Cotas: milimétricas	
± 0.5		Material: MDF		Trat. Térmico: N/A	
		Dureza: N/A		Nombre de la Parte:	
Dib.		Fecha	Nombre		
Rev.		13/11/2025	Espinoza A.		
Aprob.		13/11/2025	Flores C.		
		Máquina: Sierra de corte		Plano No: 2025111308	
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción		Sustituye al Plano No:		Hoja 3/7	
espol					



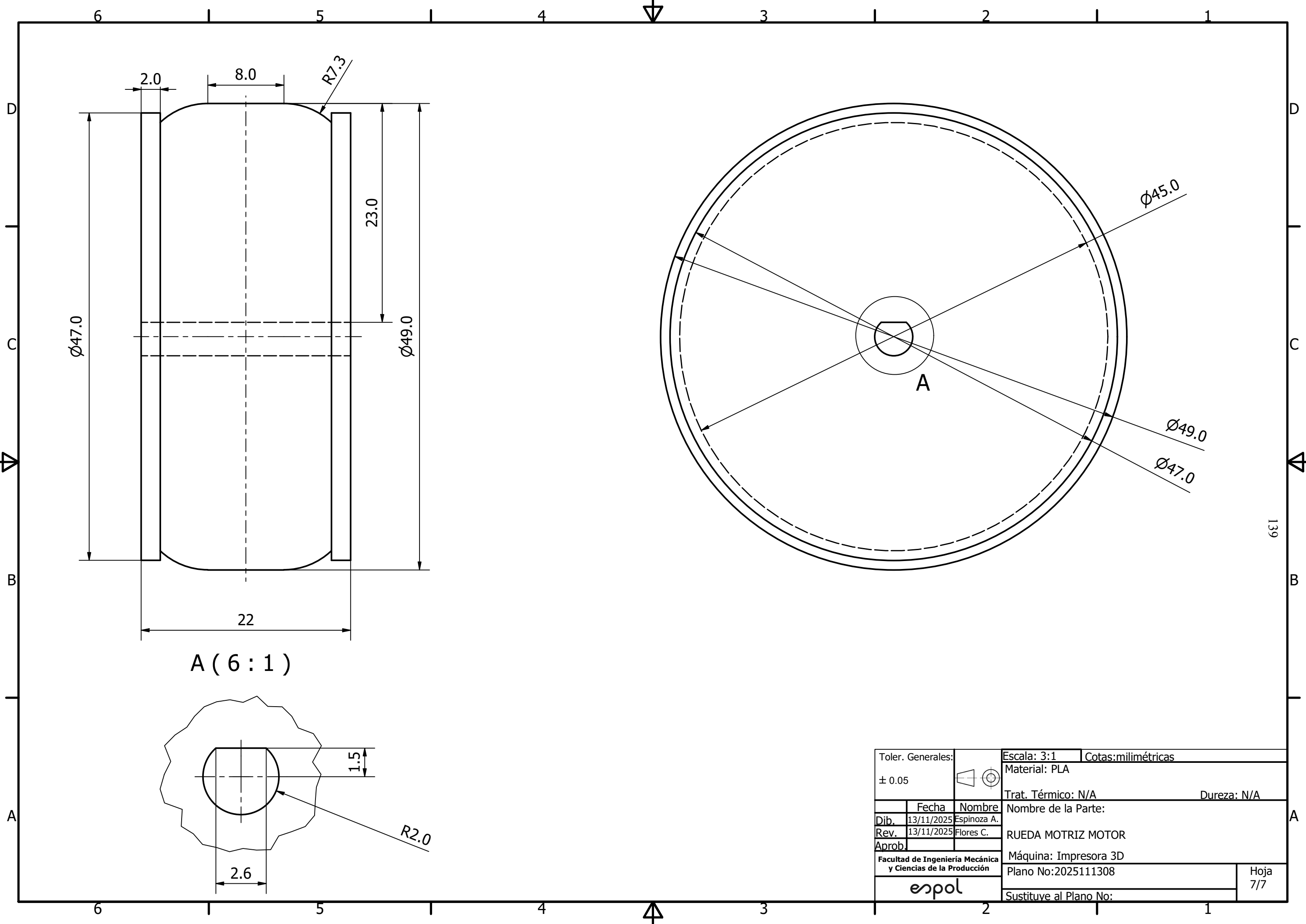
Toler. Generales:		Escala: 2:1		Cotas: milimétricas	
±0.5		Material: PLA		Dureza: N/A	
Fecha		Nombre		Nombre de la Parte:	
Dib.	13/11/2025	Espinoza A.		ESLABÓN MORDAZA	
Rev.	13/11/2025	Flores C.		Máquina: Impresora 3D	
Aprob.				Plano No: 2025111303	
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción				Hoja 4/7	
espol				Sustituye al Plano No:	



Toler. Generales:		Escala: 1:1		Cotas: milimétricas	
± 0.5		Material: PLA		Trat. Térmico: N/A	
		Dureza: N/A		Nombre de la Parte:	
Dib.		Fecha		Nombre	
13/11/2025		Espinoza A.		MORDAZA DE AGARRE	
Rev.		13/11/2025		Flores C.	
Aprob.				Máquina: Impresora 3D	
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción		Plano No: 2025111304		Hoja 5/7	
espol		Sustituye al Plano No:			



Toler. Generales:		Escala: 3:1		Cotas: milimétricas	
± 0.5		Material: PLA		Trat. Térmico: N/A	
		Dureza: N/A		Nombre de la Parte:	
		RUEDA MOTRIZ		Máquina: Impresora 3D	
Dib. 13/11/2025 Espinoza A.		Rev. 13/11/2025 Flores C.		Plano No: 2025111306	
Aprob.		Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción		Hoja 6/7	
espol		Sustituye al Plano No:			



A (6 : 1)

Toler. Generales:		Escala: 3:1		Cotas: milimétricas	
± 0.05		Material: PLA		Trat. Térmico: N/A	
		Dureza: N/A		Nombre de la Parte:	
Dib.		Fecha	Nombre		
Rev.		13/11/2025	Espinoza A.		
Aprob.		13/11/2025	Flores C.		
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción		Máquina: Impresora 3D		Plano No: 2025111308	
espol		Sustituye al Plano No:		Hoja 7/7	

Apéndice D: Evidencias de la construcción e implementación del prototipo

Este apéndice presenta evidencias visuales del proceso de construcción, montaje e implementación del prototipo desarrollado. Las imágenes incluidas documentan las etapas prácticas del proyecto y complementan la información técnica presentada en los anexos y apéndices.

D.1 Construcción y montaje del sistema de transporte

El proceso de fabricación de las piezas estructurales iniciales se muestra en la Figura 24. Posteriormente, el ensamblaje de la estructura de aluminio del sistema de transporte se presenta en la Figura 25. El primer montaje del sistema de banda transportadora se observa en la Figura 26, mientras que la estructura completamente ensamblada se presenta en la Figura 27.

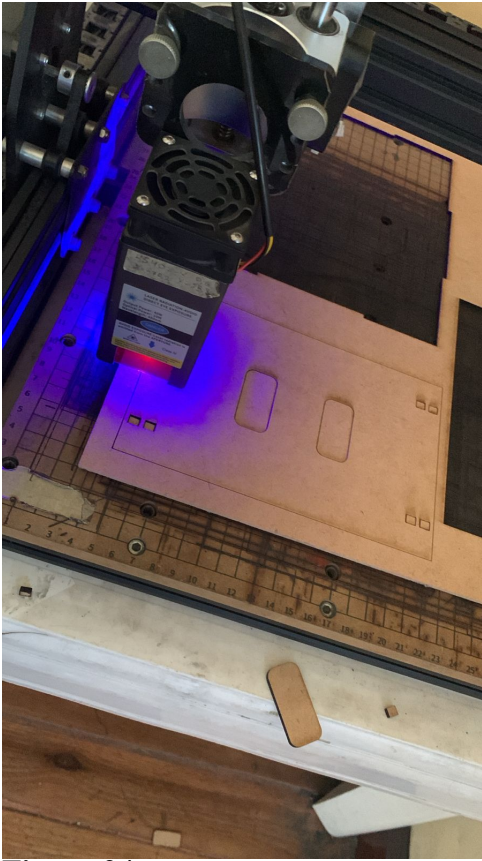


Figura 24

Corte de las partes MDF



Figura 25

Armado de estructura de aluminio



Figura 26

Montaje inicial del sistema de transporte



Figura 27

Montaje final del sistema de transporte

D.2 Sistema de inspección y clasificación

La evaluación del desempeño del modelo de clasificación se presenta mediante la matriz de confusión mostrada en la Figura 28. El montaje de la estructura del sistema de inspección y clasificación se observa en la Figura 29. Asimismo, la detección en tiempo real de mangos aptos y defectuosos se muestra en la Figura 30, mientras que la señal generada por el modelo

hacia el microcontrolador se ilustra en la Figura 31.

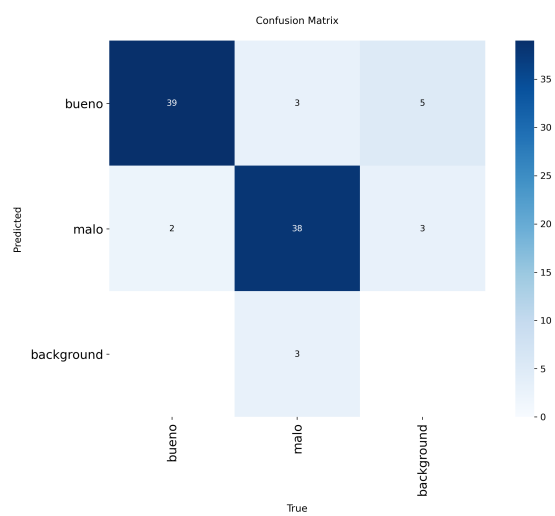


Figura 28

Matriz de confusión del modelo entrenado



Figura 29

Montaje de la estructura para la inspección y clasificación

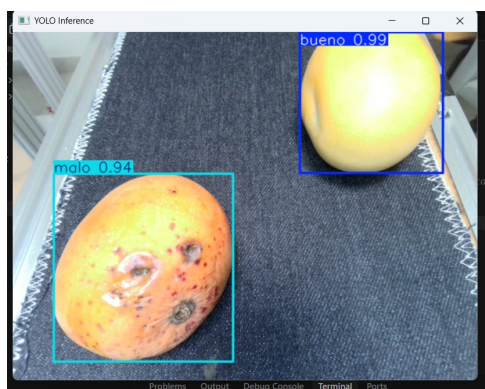


Figura 30

Detección de mangos buenos y defectuosos en la etapa de inspección

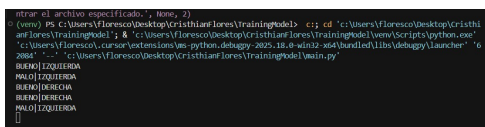


Figura 31

Decisión del modelo y envío de señal al microcontrolador

D.3 Construcción y montaje del sistema de sellado

El proceso de construcción del sistema de sellado térmico se muestra en la Figura 32.

El montaje final del sistema de sellado y empaquetado se presenta en la Figura 33.



Figura 32

Construcción del sistema de sellado



Figura 33

Montaje final del sistema de sellado y empaquetado

D.4 Pruebas y validaciones

Las pruebas eléctricas y de conexión del sistema se muestran en la Figura 34. El funcionamiento del sistema de transporte durante la operación se observa en la Figura 35. Finalmente, el resultado final del proceso automatizado de empaquetado y sellado se presenta

en la Figura 36.



Figura 34

Ajustes de conexiones en el tablero eléctrico



Figura 35

Banda transportadora en operación



Figura 36

Producto empaquetado y sellado final