

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de sistema de inspección automatizada de calidad de granos de cacao
mediante visión artificial

INGE-2931

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

José Manuel Anchundia Moyano

Danilo Alejandro Barros Palma

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias para culminar esta etapa. A mis padres: a mi madre Lorenza Isabel Moyano Cagua, ejemplo de entrega y sacrificio, y a la memoria de mi padre Manuel Eliecer Anchundia Santillán, de quien estoy seguro de que desde el cielo comparte conmigo este logro. A mis abuelos paternos, Nilo Anchundia y Marieta Santillán, que estarían orgullosos de este momento, y a mis abuelos maternos, Amalia Cagua y Emiliano Moyano, por su presencia constante y apoyo en cada paso de mi vida. A mis hermanos, Milena Deyanira y Danilo Sebastián Anchundia Moyano, por su ánimo y apoyo incondicional. A mis tíos Mercedes Anchundia y Julio Villavicencio, por brindarme un hogar que hizo posible mis estudios, y a mis tíos Nilo Leonidas Anchundia, Patricia Vélez, Nilo Euclides Anchundia y Viviana Moyano, cuyo respaldo siempre fue una fuente de fortaleza. A todos ellos, dedico este logro con la certeza de que su amor, confianza y respaldo han sido la base sobre la cual hoy puedo celebrar esta meta cumplida.

José Manuel Anchundia Moyano

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico principalmente a mi difunta abuela Ernesta Palma, quien siempre estuvo apoyándome en todos los sentidos. A mi madre, Alexandra Palma, quien siempre se esforzó para mantener nuestro hogar, estoy seguro de que está orgullosa de mí, pues este es un logro para ella también. Finalmente, a mi padre, Danilo Barros, que, a pesar de los últimos acontecimientos, fue una parte fundamental en mi infancia y desarrollo como persona.

Danilo Alejandro Barros Palma

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Dios, por concederme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa; a mi familia, por su apoyo constante y por ser fuente de motivación en cada momento; a todos mis profesores a lo largo de la carrera, cuyas enseñanzas y dedicación marcaron de manera significativa mi formación. Mi gratitud especial a Anderson Arguello, amigo que me acompañó durante toda la carrera, brindándome su apoyo incondicional, y a Yandri Uchuari, Tyrone Rodríguez y Pedro Clemente, quienes con su amistad y aliento fueron de gran inspiración en las etapas finales de este gran sueño; a mi compañero de tesis Danilo Barros, con quien compartí aprendizajes y desafíos que fortalecieron esta experiencia; y a la dirección de Robiotec Ecuador S.A., por la confianza y la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones. A todos quienes fueron parte de este camino, mi más sincera gratitud, con la certeza de que este logro es también de ustedes. Porque los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia, y cada meta cumplida es el inicio de un nuevo camino por recorrer.

José Manuel Anchundia Moyano

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la sabiduría y resiliencia para llevar a cabo toda mi carrera, a toda mi familia de parte Barros y Palma quienes son una gran parte de lo que soy hoy en día y siempre creyeron en mí, sobre todo a mi primo Néstor Zúñiga, quien me orientó a descubrir mi pasión por la tecnología y carrera. Menciono también a mis mejores amigos Byron Freire, Ángel Carrera, Allison Sáenz y James Di Luca quienes siempre han estado para mí, incluso en mis peores momentos. A mi compañero de tesis, José Anchundia, con quien he compartido clases y risas, me ha permitido realizar este proyecto junto a él y me ha ayudado sobremanera. Y finalmente, a todos los que hicieron posible este proceso.

Danilo Alejandro Barros Palma

Declaración Expresa

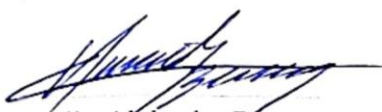
Yo/Nosotros Danilo Alejandro Barros Palma y José Manuel Anchundia Moyano acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

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 mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

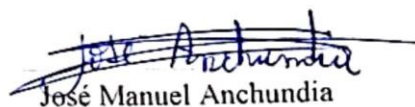
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa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

Guayaquil, 3 de junio del 2025.



Danilo Alejandro Barros

Palma



José Manuel Anchundia

Moyano

Evaluadores

Jorge Luis Hurel Ezeta, Ph.D.

Profesor de Materia

Carlos Augusto Zúñiga Reyes, MSc.

Tutor de proyecto

Resumen

El cacao fino de aroma representa uno de los principales productos de exportación de Ecuador, pero la clasificación manual de granos aún utilizada en la postcosecha presenta limitaciones asociadas a la subjetividad, fatiga del operario y baja eficiencia. En este contexto, el proyecto plantea como objetivo diseñar y construir un prototipo de sistema de inspección automatizada, basado en visión por computador y un modelo de inteligencia artificial tipo YOLO, para detectar defectos físicos en granos de cacao y optimizar el proceso de selección. Para ello se desarrolló un prototipo de laboratorio conformado por una banda transportadora, un sistema de iluminación controlada, una cámara de área, el modelo de clasificación visual y un mecanismo neumático de eyección, todos integrados mediante un microcontrolador ESP32. Las pruebas demostraron un desempeño estable en los subsistemas y una precisión de clasificación superior al 90 % en condiciones controladas. Se concluye que el sistema propuesto constituye una alternativa viable y replicable para mejorar la eficiencia y confiabilidad en procesos de selección de granos de cacao.

Palabras clave: visión por computador, clasificación automatizada, cacao, inteligencia artificial.

Abstract

Fine-flavor cocoa is one of Ecuador's main export products; however, manual bean classification still used in post-harvest processes presents limitations associated with subjectivity, operator fatigue, and low efficiency. In this context, the project aims to design and build a prototype of an automated inspection system, based on computer vision and a YOLO-based artificial intelligence model, to detect physical defects in cocoa beans and optimize the selection process. A laboratory prototype was developed, consisting of a conveyor belt, a controlled lighting system, an area-scan camera, the classification model, and a pneumatic ejection mechanism, all integrated through an ESP32 microcontroller. Tests demonstrated stable performance of the subsystems and a classification accuracy above 90 % under controlled conditions. It is concluded that the proposed system constitutes a viable and replicable alternative to improve efficiency and reliability in cocoa bean selection processes.

Keywords: *computer vision, automated classification, cocoa, artificial intelligence.*

Índice General

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice General.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Definición del Problema.....	2
1.3 Justificación del Problema.....	3
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Marco Teórico.....	6
1.5.1 Visión por Computador.....	6
1.5.2 Redes Neuronales.....	6
1.5.3 Algoritmos YOLO.....	7
1.5.3.1 Principio de funcionamiento.....	7
1.5.3.2 Características principales.....	7
1.5.4 Cámaras de visión de área.....	8
1.5.5 Sistema Embebido – ESP32.....	8
1.5.6 Motores y control de velocidad por variación de voltaje.....	9
1.5.7 Válvula neumáticas.....	10
1.5.7.1 Tipos y funcionamiento.....	10
1.5.8 Software de diseño CAD.....	11
1.5.9 Proceso industrial del cacao: desde la producción hasta la clasificación.....	11
Capítulo 2.....	12
2.1 Metodología.....	13
2.1.1 Flujograma.....	13
2.2 Definición de requisitos técnicos y restricciones del entorno de prueba.....	15
2.2.1 Requerimientos funcionales.....	15
2.2.1.1 Sistema de transporte de granos (banda transportadora):.....	15
2.2.1.2 Captura de imágenes:.....	16
2.2.1.3 Procesamiento de imágenes y clasificación:.....	17
2.2.1.4 Sistema de clasificación:.....	17

2.2.1.5 Control general del sistema de eyección:.....	17
2.2.2 Requerimientos no funcionales.....	18
2.3 Análisis de alternativas técnicas para la implementación del sistema de clasificación	18
2.3.1 Alternativa 1: Actuadores eléctricos lineales (servomecanismos	19
2.3.2 Alternativa 2: Clasificación mediante compuerta basculante	20
2.3.3 Alternativa 3: Clasificación neumática con válvulas de expulsión.....	21
2.4 Matriz de decisión para elección de alternativa de clasificación	22
2.5 Elección de componentes.....	22
2.5.1 Cámara de área.....	22
2.5.2 Luces de fondo RGB.....	24
2.5.3 Luces LED	25
2.5.4 Válvulas de eyección	26
2.5.5.1 Principales características técnicas [19]:.....	26
2.5.5 Microcontrolador	28
2.5.5.1 Características destacadas [20]:	29
2.6 Diseño Conceptual	30
2.6.1 Diseño conceptual de los subsistemas del clasificador de granos de cacao	30
2.7 Diseño básico de prototipo del sistema.....	32
2.7.1.1 Estimación del consumo eléctrico total.....	33
2.7.1.2 Selección de diámetro de la manguera para el sistema neumático	34
2.7.1.3 Estimación del tiempo de respuesta del sistema	34
2.7.2 Interconexión general del sistema.....	35
2.7.3 Sistema de comunicaciones del prototipo	37
2.7.3.1 Comunicación entre el sistema de visión y la unidad de procesamiento	37
2.7.3.2 Comunicación entre la unidad de procesamiento y el sistema de control.....	37
.....	37
.....	37
2.7.3.3 Comunicación entre el sistema de control y la unidad de activación neumática	38
2.8 Diseño al detalle del prototipo del sistema	40
2.8.2 Evaluación de modelos de detección	42
2.8.3 Ensamblaje en software CAD de los diferentes componentes que conforman el sistema. ...	43
2.8.4 Lista de materiales del prototipo del sistema	44
Capítulo 3.....	43
3.1 Resultados y análisis	44
3.1.1 Subsistema de transporte banda y accionamiento	44
3.1.2 Subsistema de iluminación: fondo RGB y luz LED blanca	47
3.1.3 Subsistema de captura de imágenes (cámara de área).....	51
3.1.4 Subsistema de inferencia mediante visión artificial.....	54
3.1.5 Subsistema de eyección e integración de otros subsistemas	57

3.2 Análisis de costos.....	62
Capítulo 4.....	43
4.1 Conclusiones	44
4.2 Recomendaciones	45
Referencias.....	46
Apéndice	49
Apéndice A	49
Plano Electrónico	49
Apéndice B.....	50
Configuración de la cámara	50
Apéndice C.....	51
Script de inferencia	51
Script de control del sistema de eyección	53
Script de etiquetado de datos	55
Repositorio del proyecto	57
Apéndice D	58
Consumo eléctrico del sistema.....	58
Apéndice E.....	59
Ficha técnica de las válvulas	59
Apéndice F	61
Resultados de la evaluación de modelos en la Jetson.	61
Apéndice G	62
Planos de sistemas mecánicos en el prototipo.....	62

Abreviaturas

AC	Corriente alterna
ADC	Convertidor analógico-digital
AGX	Denominación comercial de la plataforma <i>Jetson Orin</i>
CAD	Diseño asistido por computadora
CMOS	Semiconductor complementario de óxido metálico
CNN	Red neuronal convolucional
CVPR	Conferencia IEEE sobre visión por computador y reconocimiento de patrones
DAC	Convertidor digital-analógico
DC	Corriente continua
ESP32	Microcontrolador ESP32
ESP-IDF	Entorno de desarrollo de <i>IoT</i> de <i>Espressif</i>
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FPS	Cuadros por segundo
GB	Gigabyte
GND	Conexión a tierra
GPIO	Entrada/salida de propósito general
GPU	Unidad de procesamiento gráfico
IA	Inteligencia artificial
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador
IO	Entrada/salida
IOP	Instituto de Física
KK	Modo de control de válvulas Matrix (denominación técnica)
LED	Diodo emisor de luz
NAS	Búsqueda de arquitectura neuronal
OE	Habilitación de salida
PC	Computadora personal

PWM	Modulación por ancho de pulso
RGB	Rojo, verde y azul
ROI	Región de interés
SPI	Interfaz periférica serial
TAIHO	Denominación comercial de la tarjeta de control de válvulas
TH-446	Modelo de válvula Matrix (designación técnica)
UART	Transmisor-receptor asíncrono universal
USB	Bus universal en serie
USD	Dólar estadounidense

Simbología

D	Diámetro interno de la manguera
I_{Total}	Corriente total del sistema
L	Longitud del tramo de manguera
P_1, P_2	Presiones de entrada y salida en el sistema neumático
P_i	Potencia de cada componente conectado
Q	Caudal de aire en el sistema neumático
$T_{activación}$	Tiempo de activación de la válvula
$T_{captura}$	Tiempo de captura de imagen
$T_{comunicación}$	Tiempo de transmisión de datos
$T_{procesamiento}$	Tiempo de procesamiento del modelo
$T_{respuesta}$	Tiempo total de respuesta del sistema
V_i	Voltaje de operación de cada componente
V_{in}	Voltaje de entrada
V_{out}	Voltaje de salida
R_1, R_2	Resistencias en divisor de voltaje

Índice de figuras

Figura 1 Flujograma del proceso de diseño	14
Figura 2 Esquema funcional del sistema de transporte de granos	16
Figura 3 Esquema funcional del sistema de captura de imágenes.....	16
Figura 4 Esquema funcional del procesamiento de imágenes e inferencia.	17
Figura 5 Esquema funcional para el control del sistema de eyección.	18
Figura 6 Alternativa con actuadores lineales.....	19
Figura 7 Alternativa con compuerta basculante	20
Figura 8 Alternativa con sistema neumático.....	21
Figura 9 Cámara de área “Basler”	23
Figura 10 Tiras de leds utilizadas para el fondo RGB.....	25
Figura 11 Válvula neumática para el sistema	27
Figura 12 Placa ESP32 empleada como microcontrolador.	29
Figura 13 Esquema conceptual del sistema de captura de imágenes.....	30
Figura 14 Esquema conceptual del sistema de adquisición e inferencia.	31
Figura 15 Esquema conceptual del sistema de eyección.	31
Figura 16 Esquema conceptual del sistema de clasificación de granos de cacao.....	32
Figura 17 Arquitectura general del sistema de clasificación de granos de cacao.....	35
Figura 18 Enlace Ethernet de 10 Gb entre la cámara de área y la computadora del sistema.	37
Figura 19 Enlace serial USB entre la computadora y el microcontrolador ESP32	37
Figura 20 Comunicación entre el ESP32 y la unidad de activación neumática a través de señales digitales	38
Figura 21 Arquitectura general de comunicaciones del sistema de clasificación.....	39
Figura 22 Diagrama de subsistema de captura de imágenes e iluminación.....	40

Figura 23 Diagrama de subsistema de transporte.	41
Figura 24 Diagrama de subsistema de clasificación y eyección.....	41
Figura 25 Ensamble general del prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao..	43
Figura 26 Banda transportadora de granos de cacao.	45
Figura 27 Controlador utilizado para variar la velocidad de la banda transportadora por medio de un potenciómetro.....	45
Figura 28 Prueba de transporte de granos realizadas en el prototipo.	46
Figura 29 Diseño CAD del soporte para montaje de la luz LED Blanca	47
Figura 30 Diseño CAD del fondo RGB del sistema.	48
Figura 31 Fondo RGB montado en la estructura del prototipo.....	49
Figura 32 Luz LED Blanca montada en la estructura del prototipo.	49
Figura 33 Comparación visual de un grano de cacao con iluminación controlada RGB+LED versus iluminación convencional.....	50
Figura 35 Resultado captura de imágenes “Cacao – Bueno”	53
Figura 34 Resultado captura de imágenes “Cacao – Malo	54
Figura 36 Resultado de inferencia YOLO-NAS: granos de cacao clasificados como buenos.	56
Figura 37 Resultado de inferencia YOLO-NAS: granos de cacao clasificados como defectuosos.....	56
Figura 38 Prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao en operación con todos los subsistemas integrados.	57
Figura 39 Alineación de las boquillas de salida de aire con la trayectoria que seguirían los granos sobre la banda.....	58
Figura 40 Tarjeta de control conectada al ESP32 para la activación de válvulas.	59
Figura 41 Secuencia de prueba del prototipo: a la izquierda grano aceptado continúa en la	

trayectoria normal y a la derecha grano defectuoso es expulsado por la válvula.	61
Figura 42 Comparación visual del proceso de clasificación: flujo normal de grano (izquierda) versus eyección de grano defectuoso.	61
Figura 43 Medición de tiempos de captura, inferencia y activación durante la operación del prototipo.	62
Figura 44 Ficha técnica de la válvula (parte 1).	59
Figura 45 Ficha técnica de la válvula (parte 2).	60

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de decisión para la selección del sistema de clasificación de granos de cacao.	22
Tabla 2 Lista de materiales del prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao....	45
Tabla 3 Parámetros establecidos en la cámara para una buena captura de imágenes	52
Tabla 4 Parámetros de inferencia del subsistema de visión.....	55
Tabla 5 Resultados de validación del subsistema de eyección.	60
Tabla 6 Costos de materiales del prototipo	63
Tabla 7 Parámetros de configuración de la cámara de área utilizados en el sistema de clasificación	50
Tabla 8 Consumo eléctrico estimado de los componentes del sistema de clasificación de cacao.	58
Tabla 9 Rendimiento de los modelos en Jetson	61
Tabla 10 Parámetros prácticos de implementación y entrenamiento.....	61

Capítulo 1

1.1 Introducción

Ecuador se destaca en la esfera mundial por su liderazgo en producción y exportación de cacao fino de aroma, especialidad que lo posicionó como el tercer producto no petrolero más rentable en 2024, con ingresos superiores a los USD 3 617 millones [1]. Además, el país representa una parte considerable del mercado mundial de esta variedad de alta calidad [2]. Esta actividad agrícola no solo impulsa la economía nacional, sino que también sustenta el sustento de miles de familias rurales.

No obstante, el método convencional de clasificación manual durante la postcosecha enfrenta desafíos significativos: sujeta a la percepción subjetiva, la fatiga humana y la falta de estándares consistentes, esta práctica compromete tanto la eficiencia del proceso como la uniformidad del producto final. Frente a estas limitaciones, resultan prometedoras las soluciones tecnológicas fundamentadas en sistemas de visión e inteligencia artificiales para automatizar y perfeccionar el control de calidad del cacao.

Este proyecto presenta el diseño y validación de un prototipo automatizado en laboratorio, destinado a detectar defectos físicos en granos de cacao. Los capítulos siguientes exponen el marco teórico, la metodología de ingeniería, el desarrollo técnico del sistema y una evaluación cuantitativa de su desempeño.

1.2 Definición del Problema.

En el contexto agroindustrial ecuatoriano, la clasificación de granos de cacao continúa realizándose, en gran medida, de manera manual, lo que genera múltiples limitaciones técnicas y operativas. La inspección visual a cargo de los trabajadores presenta una alta variabilidad entre evaluaciones, está expuesta a errores humanos, al desgaste derivado de extensas jornadas laborales y a una baja capacidad de procesamiento. Estas condiciones afectan de forma directa la uniformidad de la calidad y reducen la productividad

de la etapa de postcosecha [3].

Aunque Ecuador lidera la producción mundial de cacao fino de aroma, la ausencia de sistemas automatizados de inspección limita su competitividad en mercados internacionales, donde se demandan altos niveles de trazabilidad y control de calidad. A esto se suma que una parte significativa de la producción puede ser rechazada o subvalorada por fallos en la selección, generando pérdidas económicas relevantes. El problema puede evidenciarse mediante indicadores como la tasa de errores en la clasificación manual, el volumen de granos descartados por criterios subjetivos, el tiempo promedio requerido por lote y los costos asociados al recurso humano. Estos parámetros reflejan el impacto de la ineficiencia del sistema actual y sustentan la necesidad de adoptar mecanismos más precisos y estandarizados.

En consecuencia, se plantea la urgencia de desarrollar un sistema de inspección automatizada que permita identificar defectos físicos en los granos de cacao, con el fin de optimizar la clasificación, reducir las pérdidas y mejorar la eficiencia operativa del sector.

1.3 Justificación del Problema

Se desarrollará un sistema de inspección automatizada para granos de cacao, orientado a detectar imperfecciones físicas como moho, daño estructural o descomposición. La clasificación se llevará a cabo mediante técnicas de visión por computador combinadas con inteligencia artificial, utilizando un modelo de detección tipo YOLO, entrenado específicamente para identificar estas características visuales a partir de imágenes capturadas en un entorno controlado. La propuesta contempla el montaje de un prototipo en laboratorio que incluirá una banda transportadora en escala reducida, una cámara de área, un sistema de iluminación LED y un microcontrolador encargado del procesamiento y control. El proceso consiste en la toma de imágenes, su análisis mediante el modelo entrenado, y la activación de

un sistema neumático que expulsará los granos defectuosos. Este mecanismo será una adaptación a menor escala de una tecnología ya utilizada en maquinaria industrial para separación de materiales.

El enfoque busca reemplazar el proceso manual de inspección por una solución más precisa, uniforme y eficiente. La automatización del sistema permitirá mejorar la detección de defectos, minimizar la intervención humana y aumentar el rendimiento operativo. A lo largo de la validación, se recopilarán métricas relevantes como precisión de clasificación, tiempo de respuesta y eficacia del sistema de eyección, lo cual permitirá evaluar su desempeño técnico de forma objetiva. Este proyecto representa una base tecnológica adaptable y replicable que puede aplicarse en diferentes entornos agroindustriales, promoviendo la innovación en los procesos postcosecha del cacao mediante soluciones inteligentes, eficientes y accesibles.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo funcional de sistema de inspección automatizada, mediante técnicas de visión por computador basadas en YOLO, para detectar defectos físicos en granos de cacao y optimizar el proceso de clasificación postcosecha.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar el soporte estructural del sistema de clasificación para proporcionar una base mecánica que integre los subsistemas de transporte, visión por computador y expulsión.
2. Implementar un sistema de adquisición de imágenes con cámara de área e iluminación controlada para capturar evidencias visuales de los granos durante su desplazamiento.
3. Generar un modelo de detección basado en la arquitectura YOLO para identificar visualmente granos defectuosos según características superficiales específicas.
4. Integrar un subsistema de eyección automatizada mediante válvulas neumáticas y control electrónico para separar los granos defectuosos durante el proceso de clasificación.
5. Elaborar planos de fabricación, diagramas eléctricos y representaciones gráficas del sistema para documentar la arquitectura del prototipo y su integración funcional.
6. Realizar pruebas del sistema bajo condiciones controladas para evidenciar su funcionamiento técnico y operativo.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Visión por Computador

La visión por computador, como rama de la inteligencia artificial, habilita a los sistemas informáticos para comprender y analizar información visual proveniente de imágenes digitales con el fin de apoyar la toma de decisiones. Su operación suele estructurarse en una cadena de fases: (1) adquisición de imágenes, (2) preprocesamiento —que puede incluir filtrado y segmentación—, (3) extracción de rasgos o descriptores relevantes y (4) etapa decisoria, en la que modelos de aprendizaje automático emiten la clasificación o la acción correspondiente [4].

Este enfoque resulta especialmente pertinente en entornos agroindustriales, donde es necesario reconocer alteraciones superficiales —como presencia de moho, decoloraciones o deformaciones— en productos agrícolas; en el caso del cacao, permite discriminar de manera más consistente la calidad de los granos.

1.5.2 Redes Neuronales

Las denominadas redes neuronales profundas, conocidas como *deep learning*, constituyen modelos de inteligencia artificial conformados por múltiples niveles de procesamiento interrelacionados, cuyo diseño se inspira en la organización del cerebro humano. Su principal ventaja radica en la capacidad de generar, de manera automática, representaciones jerárquicas de la información —por ejemplo, de imágenes—, evitando así la necesidad de elaborar manualmente las características a analizar.

Dentro de este campo, las redes convolucionales (CNN) se distinguen por la presencia de capas de convolución, funciones de activación, etapas de agrupamiento y capas completamente conectadas, lo que les otorga resistencia frente a variaciones espaciales y la posibilidad de trabajar con volúmenes relativamente pequeños de datos etiquetados. Con el paso del tiempo, estas arquitecturas han experimentado un notable desarrollo, alcanzando mejoras constantes tanto en precisión como en eficiencia [5].

1.5.3 Algoritmos YOLO

Los algoritmos *YOLO* se enmarcan en la clasificación de los detectores de objetos de una sola etapa, caracterizados por procesar la totalidad de la imagen en un único paso. Esta estrategia permite realizar de manera simultánea la localización y la clasificación de objetos, alcanzando altos niveles de velocidad y eficiencia. Bajo este enfoque, el problema de detección se formula como una tarea de regresión que estima tanto las coordenadas de los cuadros delimitadores como la probabilidad de pertenencia a una clase [6].

1.5.3.1 Principio de funcionamiento

1. La imagen se divide en una cuadrícula de tamaño $S \times S$, donde cada celda se responsabiliza de detectar los objetos cuyo centro se ubique en su interior.
2. Cada celda produce B cuadros delimitadores acompañados de puntuaciones de confianza y distribuciones de probabilidad por clase, consolidando toda la información en un único tensor de salida.
3. Una vez obtenidas las predicciones, se aplican técnicas de supresión no máxima para eliminar redundancias, descartando cajas solapadas y conservando únicamente la de mayor confianza. Al tratarse de una red unificada, el modelo posibilita una optimización completa *end-to-end* y permite realizar inferencias en tiempo real, con un balance adecuado entre velocidad, precisión y complejidad, superando en eficiencia a métodos de dos etapas como R-CNN.

1.5.3.2 Características principales

- *YOLO* procesa la imagen en su conjunto, aprovechando el contexto global y evitando el uso de ventanas deslizantes o propuestas de regiones, lo que disminuye significativamente la carga computacional.
- En condiciones estándar, los modelos base logran trabajar a velocidades

cercanas a 45 FPS, mientras que las versiones optimizadas para hardware con recursos limitados pueden superar los 150 FPS en GPU.

- Durante la fase de entrenamiento, cada celda aprende a reconocer patrones específicos de objetos a partir del valor de IoU más alto, lo que favorece la correspondencia entre la predicción y la realidad.
- La familia de arquitecturas *YOLO* ha evolucionado incorporando capas más profundas, la utilización de cajas ancla, funciones de pérdida mejoradas y mecanismos de detección en múltiples escalas, sin abandonar su esencia de detección rápida y eficiente.

1.5.4 Cámaras de visión de área

Las denominadas cámaras de visión de área permiten obtener una imagen completa en una sola captura, gracias a un sensor bidimensional que registra de manera simultánea la información de todos los píxeles. Este método de adquisición las convierte en una alternativa adecuada para la inspección de objetos estáticos o de desplazamiento lento, además de simplificar los procesos de configuración y calibración dentro de aplicaciones de visión por computador [7].

Este tipo de cámaras se caracteriza por su versatilidad operativa, ya que no requieren un movimiento continuo para funcionar, ofrecen una resolución espacial elevada que facilita el análisis de objetos con geometrías complejas y, en términos generales, representan una opción de bajo costo. No obstante, presentan ciertas restricciones en escenarios donde se involucra movimiento rápido o se necesita una mayor cobertura espacial, lo que limita su desempeño frente a otros sensores disponibles en el mercado.

1.5.5 Sistema Embebido – ESP32

El ESP32 corresponde a un microcontrolador clasificado como “*System on a Chip*”

(SoC), ya que integra en una sola unidad el procesador, la memoria, los módulos de conectividad inalámbrica y una amplia variedad de periféricos. Estas características lo convierten en una opción idónea para sistemas embebidos que requieren control en tiempo real. Dispone de dos núcleos *Tensilica LX6* de 32 bits, cuya frecuencia de operación se sitúa entre 160 y 240 MHz, ofreciendo la potencia necesaria para ejecutar algoritmos de elevada complejidad en entornos integrados. Dentro de su arquitectura se incluyen interfaces de comunicación inalámbrica como Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita su implementación en aplicaciones modernas que demandan conectividad. Además, incorpora un conjunto diverso de periféricos: entradas/salidas de propósito general (GPIO), conversores ADC y DAC, así como protocolos de comunicación estándar como SPI, I2C, UART, PWM e I²S, lo que otorga gran versatilidad en tareas de adquisición de datos, control y automatización.

El ESP32 también destaca por sus modos de administración de energía, que van desde estados de bajo consumo como *deep-sleep* hasta un rendimiento pleno, adaptándose a distintos escenarios de uso. Gracias a su integración, bajo costo y el respaldo de una comunidad de desarrollo abierta, este dispositivo se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en proyectos académicos, prototipos industriales y aplicaciones vinculadas al Internet de las Cosas [8].

1.5.6 Motores y control de velocidad por variación de voltaje

En aplicaciones donde no es indispensable contar con un control de precisión ni con retroalimentación activa, una solución práctica y de bajo costo consiste en colocar un potenciómetro conectado en serie con un motor de corriente continua. Al variar la resistencia del potenciómetro, se modifica el voltaje que llega al motor, lo que permite ajustar su velocidad de manera proporcional y directa [9]. La relación entre el voltaje de entrada (V_{in}), el voltaje de salida (V_{out}) y las resistencias (R_{1fija} y R_2 derivada del potenciómetro) puede expresarse

como:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.1)$$

Esta expresión corresponde al principio del divisor de voltaje, y posibilita calcular el valor del voltaje que efectivamente recibe el motor en función de la posición establecida en el potenciómetro.

1.5.7 Válvula neumáticas

Las válvulas neumáticas constituyen dispositivos de control encargados de regular y dirigir el flujo de aire comprimido, permitiendo la activación de actuadores. Su papel resulta fundamental en procesos industriales donde se demanda un control preciso del movimiento, como sucede en sistemas automáticos de clasificación y separación [10].

1.5.7.1 Tipos y funcionamiento.

- **Válvulas direccionales (2/2, 3/2, 5/2, etc.):** se utilizan para definir la trayectoria del aire hacia los actuadores. Las de tipo 2/2 realizan únicamente la apertura o cierre del paso, mientras que las de tipo 5/2 permiten gestionar el movimiento de doble acción en cilindros con dos cámaras.
- **Válvulas solenoides:** se accionan de manera eléctrica a través de una bobina electromagnética que desplaza un émbolo o membrana. Este mecanismo posibilita una conmutación rápida y precisa, ideal para la automatización de ciclos de eyección.
- **Válvulas de flujo:** su función es regular la velocidad de los actuadores controlando el caudal de aire que los alimenta.

La elección adecuada de estos componentes depende de variables como el tiempo de respuesta, la compatibilidad entre presión y caudal, el diseño del circuito y la vida útil

esperada. En particular, las válvulas solenoides destacan por su baja fricción interna, alta eficiencia energética y gran exactitud en la sincronización, siendo capaces de operar millones de ciclos sin requerir mantenimiento correctivo.

1.5.8 Software de diseño CAD

El software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) posibilita la creación de modelos digitales en dos y tres dimensiones, lo que facilita analizar y modificar estructuras mecánicas antes de fabricar prototipos físicos. Esta capacidad de generar representaciones virtuales acelera las fases de diseño, disminuye los costos asociados y mejora la comunicación técnica dentro de equipos multidisciplinarios [11].

Los entornos CAD ofrecen funcionalidades clave a través del modelado paramétrico, el cual permite definir geometrías basadas en variables y relaciones dimensionales, actualizando el diseño de forma automática ante cualquier cambio. Además, incorporan herramientas de simulación que hacen posible verificar tensiones, deformaciones e interferencias, al mismo tiempo que generan documentación técnica estandarizada, como planos, listas de materiales y diagramas ajustados a normativas industriales.

En el ámbito del prototipado, estas plataformas facilitan una iteración rápida de diseños, lo que permite comparar alternativas sin incurrir en gastos de fabricación física. Asimismo, permiten detectar con antelación posibles conflictos geométricos o restricciones de manufactura, optimizando así el proceso de desarrollo. El carácter digital de los modelos también promueve la colaboración eficiente mediante el intercambio de archivos, la integración con sistemas de manufactura asistida y la realización de revisiones técnicas de manera distribuida.

1.5.9 Proceso industrial del cacao: desde la producción hasta la clasificación

La cadena productiva del cacao constituye un proceso de carácter complejo que

abarca tanto etapas agronómicas como de postcosecha, todas ellas determinantes para asegurar la calidad comercial del grano. El ciclo comienza con la cosecha de las mazorcas maduras, cuya madurez fisiológica se identifica a través de cambios cromáticos en la cáscara [12]. Posteriormente, se procede a la extracción manual de las semillas recubiertas de pulpa, las cuales ingresan a un proceso de fermentación natural de entre cinco y ocho días. Esta fase resulta esencial, ya que favorece la formación de precursores aromáticos y, al mismo tiempo, inactiva el embrión mediante la acción de microorganismos controlados [13]. Una vez concluida la fermentación, se realiza el secado hasta alcanzar un contenido de humedad comprendido entre el 6 % y el 8 %, utilizando métodos solares o artificiales. Esta operación evita el desarrollo de hongos y conserva las propiedades organolépticas del cacao [14].

Finalmente, se lleva a cabo la etapa de clasificación, que elimina impurezas y separa los granos según estándares de calidad, determinando con ello el valor comercial definitivo [15]. Tradicionalmente, esta clasificación se efectúa mediante inspección visual y táctil manual, práctica orientada a detectar defectos como presencia de hongos, germinación, fracturas o infestaciones de insectos. Sin embargo, al depender del criterio humano, el método presenta variabilidad y resulta limitado para manejar grandes volúmenes [14]. Como alternativa, se han implementado sistemas mecánicos basados en zarandas vibratorias y separadores neumáticos por densidad, los cuales incrementan la velocidad de operación. No obstante, su eficacia continúa sujeta a la calibración precisa de los equipos y a la uniformidad del material procesado [12]. Tanto los métodos manuales como los mecánicos revelan limitaciones en precisión y consistencia, lo que compromete la homogeneidad de los lotes y restringe su competitividad en mercados especializados.

Capítulo 2

2.1 Metodología

En este capítulo se detalla la metodología empleada para el desarrollo del sistema automatizado de inspección y clasificación de granos de cacao, abarcando desde la evaluación de alternativas técnicas hasta la implementación del prototipo funcional. Se describe cómo se seleccionó la mejor estrategia de diseño con base en criterios de eficiencia, viabilidad técnica y adaptabilidad al entorno agroindustrial. Asimismo, se explica la estructura metodológica utilizada para llevar a cabo el desarrollo del sistema, incluyendo los procesos de adquisición de datos, entrenamiento del modelo de detección basado en visión por computador, diseño e integración de componentes mecánicos y electrónicos, así como los ensayos realizados en condiciones controladas.

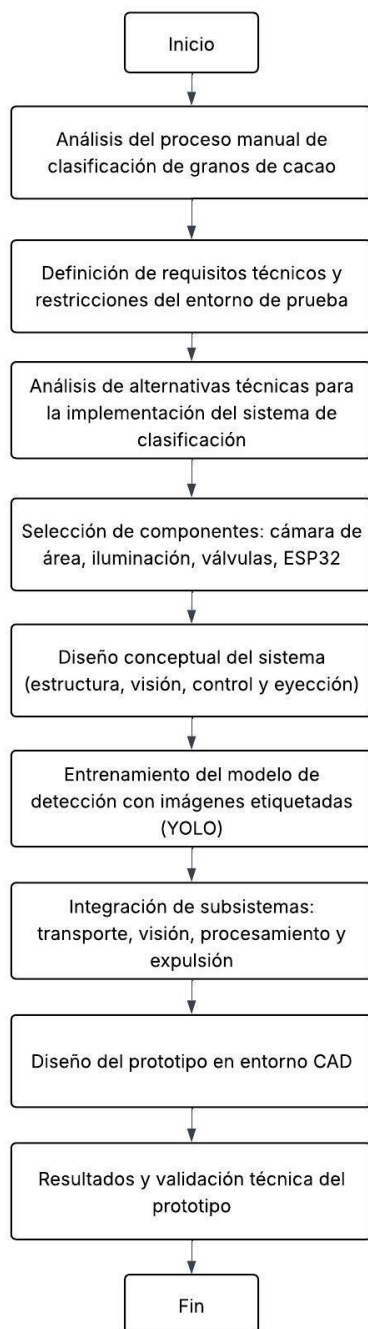
Esta sección también aborda las justificaciones técnicas que respaldan cada decisión de diseño, los criterios de selección de equipos y recursos, y las especificaciones técnicas del producto final. Finalmente, se presentan las consideraciones éticas y legales asociadas al uso de tecnologías automatizadas en entornos productivos, garantizando que el enfoque adoptado sea responsable, replicable y alineado con los objetivos del estudio.

2.1.1 Flujograma

En la Figura 2.1 se presenta el flujograma que resume las etapas metodológicas seguidas para el diseño y desarrollo del sistema automatizado de clasificación de granos de cacao.

Figura 1

Flujograma del proceso de diseño



En el **Capítulo 1** se expuso el análisis del proceso manual de clasificación de granos de cacao, información que permitió establecer los requerimientos técnicos y las restricciones propias del entorno de prueba. Con base en estos lineamientos se evaluaron diferentes alternativas tecnológicas, seleccionando la opción más adecuada y elaborando un diseño

conceptual que integró la estructura general, el sistema de visión, el control de procesos y el mecanismo de eyección. A partir de este diseño se definieron los componentes principales — cámara de área, sistema de iluminación, válvulas de expulsión y microcontrolador ESP32— y se construyó un modelo tridimensional del prototipo en un entorno de diseño asistido por computadora (CAD). Posteriormente, se integraron los subsistemas de transporte, visión y procesamiento con el fin de garantizar una captura de imágenes confiable y estable. Una vez operativo el sistema de adquisición visual, se entrenó un modelo de detección basado en la arquitectura *YOLO*, utilizando un conjunto de imágenes previamente etiquetadas de granos de cacao. Tras esta etapa, se incorporó el subsistema de eyección, encargado de ejecutar de manera física la separación de acuerdo con las decisiones emitidas por el modelo de clasificación.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento orientadas a verificar la precisión, la velocidad y la confiabilidad del prototipo, lo que permitió confirmar la viabilidad técnica de la solución propuesta.

2.2 Definición de requisitos técnicos y restricciones del entorno de prueba

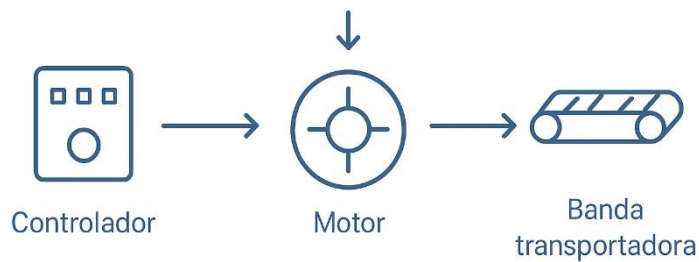
2.2.1 *Requerimientos funcionales*

2.2.1.1 Sistema de transporte de granos (banda transportadora):

- Debe permitir el desplazamiento lineal y constante de granos de cacao en una sola fila.
- La banda debe tener dimensiones reducidas, apropiadas para prototipo de laboratorio.
- La velocidad de la banda debe ser constante y ajustable, adecuada para sincronización con el sistema de captura de imágenes.

Figura 2

Esquema funcional del sistema de transporte de granos.

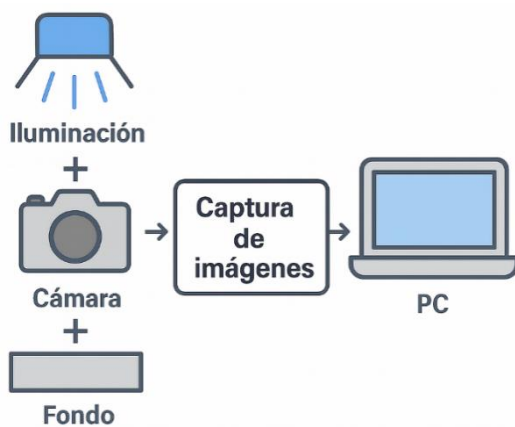


2.2.1.2 Captura de imágenes:

- Se utilizará una cámara de área compatible con algún software para la adquisición de imágenes.
- La cámara deberá estar montada en una posición fija que permita capturar imágenes claras y centradas de los granos de cacao en movimiento.
- La iluminación deberá ser controlada y constante, para garantizar uniformidad en la captura de datos.

Figura 3

Esquema funcional del sistema de captura de imágenes.



2.2.1.3 Procesamiento de imágenes y clasificación:

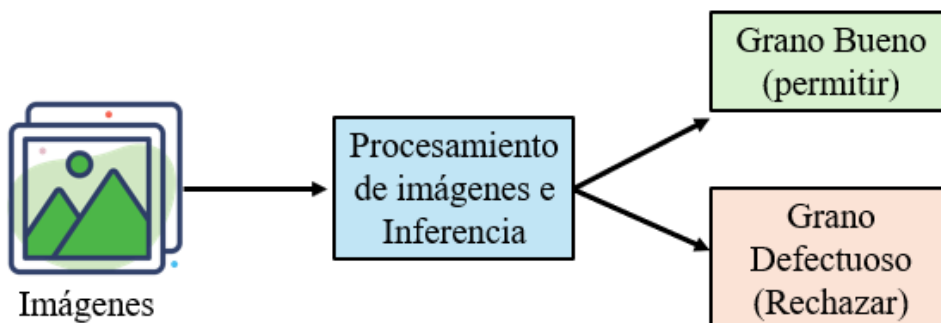
- Se deberá desarrollar un sistema de redes neuronales capaz de identificar el estado de calidad de los granos (bueno o defectuoso).
- La clasificación se realizará mediante un modelo de inteligencia artificial (IA) entrenado previamente con un dataset generado por el equipo.
- El sistema deberá analizar cada imagen en tiempo real y tomar una decisión binaria: permitir pasar o rechazar el grano.

2.2.1.4 Sistema de clasificación:

- Si el grano es clasificado como defectuoso, el sistema deberá separar dicho grano de la línea del proceso normal.
- La clasificación será efectuada mediante una placa de control comercial conectada a un microcontrolador ESP32.

Figura 4

Esquema funcional del procesamiento de imágenes e inferencia.



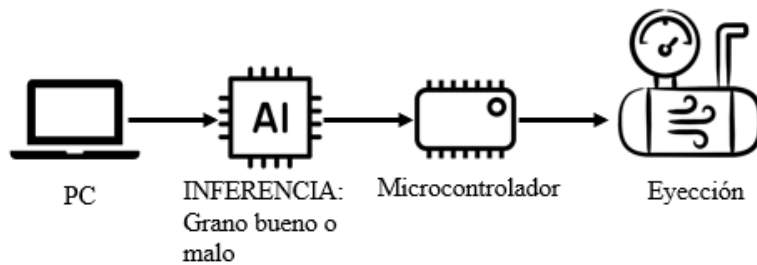
2.2.1.5 Control general del sistema de eyección:

- El ESP32 deberá coordinar la activación del sistema clasificador en función de los resultados de la clasificación.

- Se deberá implementar la lógica de sincronización entre el movimiento del grano, la captura de imagen, el análisis IA y la clasificación.

Figura 5

Esquema funcional para el control del sistema de eyección.



2.2.2 Requerimientos no funcionales

- El sistema debe ser modular y escalable, permitiendo mejoras futuras.
- La interfaz de programación debe ser clara y documentada.
- El sistema debe funcionar bajo condiciones de laboratorio, con pruebas repetibles.
- La ejecución del sistema debe ser segura, evitando riesgos mecánicos o eléctricos.
- Se priorizará el uso de componentes disponibles en el mercado local para facilitar el montaje y la replicación del prototipo.

2.3 Análisis de alternativas técnicas para la implementación del sistema de clasificación

En la fase de diseño del sistema se analizaron tres alternativas tecnológicas para implementar la clasificación automática de granos de cacao, tomando como criterios principales la velocidad de respuesta, el nivel de precisión, la facilidad de integración y la factibilidad técnica.

2.3.1 Alternativa 1: Actuadores eléctricos lineales (servomecanismos)

El uso de actuadores eléctricos o servomotores lineales ofrece un control muy preciso tanto de la trayectoria como de la fuerza aplicada [16]. Estos dispositivos resultan adecuados para movimientos complejos o con múltiples posiciones, aunque presentan desventajas relacionadas con su mayor complejidad mecánica, la necesidad de un espacio considerable para su montaje y un costo de implementación más elevado.

En el caso de una línea de clasificación continua, su empleo implicaría tiempos de posicionamiento más prolongados por cada muestra, lo que limita su eficacia en procesos de alta velocidad. La propuesta consideraba la utilización de microactuadores eléctricos o servomecanismos de empuje que desvían el grano defectuoso fuera de la trayectoria principal. El principio de funcionamiento se basaba en la activación de un brazo o paleta articulada al detectar una imperfección. Aunque esta solución garantiza exactitud en el posicionamiento y ofrece control programable del movimiento, su principal desventaja radica en un tiempo de respuesta inferior al de otras tecnologías, lo que resulta crítico en sistemas de transporte continuo como el de una banda.

Figura 6

Alternativa con actuadores lineales



Nota. Imagen tomada de LinMot, 2024, disponible en: <https://linmot.com/es/blog/separar-un-manjar-desvio-de-valiosas-piezas-de-pescado-con-motores-lineales>

2.3.2 Alternativa 2: Clasificación mediante compuerta basculante

Otra opción evaluada consistió en implementar una compuerta abatible ubicada al final de la banda transportadora, con la función de desviar los granos hacia dos posibles trayectorias: una destinada al producto aceptado y otra al rechazo.

La principal ventaja de este enfoque radicaba en su sencillez mecánica, ya que no requiere un sistema complejo de accionamiento. Sin embargo, resultó inviable para el caso de estudio debido a su incompatibilidad con un esquema de clasificación en línea. El método obligaba a acumular varios granos y ejecutar la decisión de forma grupal, lo que contrasta con la lógica de un sistema de visión por computador, en el que se necesita evaluar y decidir sobre cada grano de manera individual y en tiempo real.

Figura 7

Alternativa con compuerta basculante



Nota. Imagen tomada de Oliver Manufacturing, s.f., disponible en: <https://olivermanufacturing.com/all-products/flag-gates-magnetic-fraction-dividers>

2.3.3 Alternativa 3: Clasificación neumática con válvulas de expulsión

La tercera opción analizada planteó el uso de válvulas neumáticas de alta velocidad, diseñadas para expulsar de manera selectiva los granos defectuosos hacia un canal de descarte. Este mecanismo se consideró el más adecuado, ya que ofrece tiempos de respuesta en el rango de los milisegundos, además de brindar robustez operativa y una integración sencilla con las señales digitales generadas por el sistema de visión artificial. El empleo de válvulas solenoides, acopladas a boquillas direccionadas, permite efectuar expulsiones precisas sin requerir contacto físico con el producto, lo que disminuye el riesgo de deterioro en los granos. En aplicaciones similares, esta tecnología ha demostrado incrementar la productividad hasta en un 80 % y elevar la eficiencia de separación de un 80 % a cerca del 98 % [17].

Figura 8

Alternativa con sistema neumático.



Nota. Imagen tomada de Tomra, s.f., disponible en:
<https://www.tomra.com/food/categories/nuts-and-dried-fruit/almonds>

2.4 Matriz de decisión para elección de alternativa de clasificación

Tabla 1

Matriz de decisión para la selección del sistema de clasificación de granos de cacao.

Alternativa	Velocidad de respuesta (40%)	Cuidado Del Producto (25%)	Integración Y Mantenimiento (20%)	Costo (15%)	Puntaje Total
Compuerta Basculante	3	4	3	4	3.40
Actuadores eléctricos lineales	4	3	3	2	3.25
Válvulas de expulsión neumática	5	4	4	3	4.25

Nota. La ponderación de los criterios de evaluación (velocidad de respuesta, cuidado del producto, facilidad de integración y mantenimiento, y costo de implementación) fue establecida en conjunto por los dos integrantes del equipo de diseño. Los puntajes asignados a cada alternativa representan una evaluación relativa en una escala de 1 a 5.

Con base en los resultados obtenidos en la matriz de decisión (Tabla 1), la alternativa elegida correspondió al uso de válvulas neumáticas. Esta opción alcanzó la puntuación global más alta al ofrecer una respuesta rápida, junto con un nivel adecuado de integración y facilidad de mantenimiento, manteniendo además un costo de implementación competitivo en comparación con las demás alternativas evaluadas.

2.5 Elección de componentes

2.5.1 Cámara de área

Para la etapa de captura visual se utilizó una cámara de área, seleccionada por su capacidad de obtener imágenes de alta resolución en un único disparo. Este tipo de sensor resultó apropiado para el entorno de trabajo establecido, ya que permitió registrar con nitidez la superficie de cada grano de cacao mientras se desplazaba individualmente sobre la banda

transportadora.

De acuerdo con las especificaciones técnicas del dispositivo, se optó por un modelo de la serie *ace U* con interfaz *GigE Vision*. Entre sus características más relevantes se destacan [18]:

- Resolución de $1\,920 \times 1\,200$ píxeles, adecuada para detectar defectos pequeños en los granos.
- Velocidad de captura de hasta 150 FPS, lo que asegura registrar cada grano en movimiento sin pérdida de información.
- Sensor CMOS con obturador global, que evita distorsiones producidas por el desplazamiento.
- Interfaz *GigE Vision*, estándar robusto que admite transmisión de datos hasta 100 m y es compatible con PoE (*Power over Ethernet*) conforme a IEEE 802.3af.
- Dimensiones compactas ($\sim 29 \times 29 \times 42$ mm), que facilitan su instalación directa en la línea de inspección sin interferir físicamente con otros componentes.
- Compatibilidad con software de gestión de cámaras, lo que permite configurar parámetros como exposición, ROI, ganancia o disparo por hardware de manera remota.

Figura 9

Cámara de área “Basler”



Nota. Imagen tomada de Basler, 2024, disponible en:

<https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca1920-150um-gige-color/>

2.5.2 Luces de fondo RGB

Para asegurar una iluminación uniforme y controlada en la zona de captura, se implementó un sistema modular de placas LED RGB alimentadas a 48 V y con capacidad de conexión en serie. Estas unidades disponen de canales independientes para los tres colores primarios (rojo, verde y azul), lo que permite variar la tonalidad del fondo según las condiciones de cada objeto analizado. El sistema de control se estructuró con cinco líneas: +48 V, GND y los tres canales RGB, posibilitando el ajuste dinámico del color de fondo mediante un controlador externo. La selección de este tipo de iluminación se justificó por su capacidad para modificar el contraste espectral entre el grano de cacao y el fondo, aspecto clave para optimizar la segmentación de imágenes en el modelo de detección. Asimismo, la opción de conectar múltiples placas en serie permitió adaptarse a diferentes longitudes de banda transportadora, manteniendo la uniformidad de la luz.

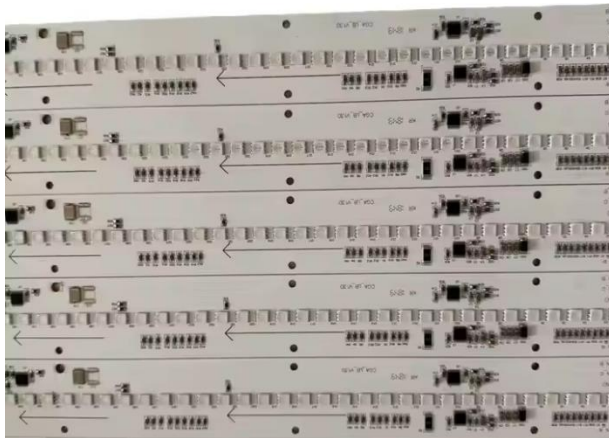
Entre sus principales ventajas se encuentran:

- Regulación independiente de la intensidad para cada canal RGB.
- Operación a 48 V, compatible con fuentes de uso industrial.
- Escalabilidad mediante conexión en serie.
- Compatibilidad con controladores externos, ya sea de tipo PWM o analógico.

Esta configuración posibilitó crear escenarios de iluminación ajustables y repetibles, lo que favoreció la obtención de imágenes consistentes durante las pruebas realizadas.

Figura 10

Tiras de leds utilizadas para el fondo RGB



Nota. Imagen tomada del proveedor Hefei Edison M&E Co., Ltd. En AliExpress, s.f., disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/Famous-Brand-Color-Sorter-Spare-Parts_1601261901291.html?

2.5.3 Luces LED

De manera complementaria, se incorporó un sistema de luces LED blancas regulables mediante una línea de control PWM. Estas luminarias fueron diseñadas para operar con alimentación de 48 V en corriente continua y disponen de tres pines de conexión: +48 V, GND y PWM, lo que posibilita ajustar la intensidad del brillo a través de un controlador digital o un microcontrolador.

A diferencia de las luces RGB, este conjunto fue destinado a la iluminación directa de la zona de inspección, aportando uniformidad en la intensidad sin modificar la temperatura de color. Esta condición resultó determinante para evitar la aparición de sombras pronunciadas o áreas sobreexpuestas, garantizando una mejor calidad en los datos visuales suministrados al modelo de clasificación.

Entre sus principales ventajas se destacan:

- Regulación precisa del nivel de brillo sin comprometer la fidelidad cromática.
- Integración sencilla con señales digitales estándar (3.3 V o 5 V PWM).
- Posibilidad de conexión en serie, lo que facilita cubrir áreas de mayor tamaño.
- Baja emisión de calor, adecuada para operaciones continuas y prolongadas.

Ambos sistemas de iluminación fueron instalados en soportes fabricados mediante impresión 3D y dispuestos estratégicamente en relación con la cámara y el fondo. Esta disposición aseguró una iluminación controlada, modular y uniforme, condición indispensable para el funcionamiento confiable del sistema de visión por computador.

2.5.4 Válvulas de eyección

Para realizar la expulsión selectiva de los granos defectuosos se empleó una válvula neumática de alta frecuencia, diseñada específicamente para aplicaciones de clasificación automática en líneas de selección. La elección de este tipo de componente respondió a su adecuado balance entre velocidad de respuesta, caudal, confiabilidad y dimensiones compactas, aspectos esenciales para garantizar un funcionamiento eficiente del sistema de eyección en tiempo real.

El dispositivo cuenta con un diseño optimizado que permite alcanzar tiempos de apertura y cierre en el orden de los milisegundos, manteniendo así la sincronía entre la decisión del sistema de visión y la eyección del grano en la zona de rechazo. Esta capacidad asegura que cada grano pueda ser desviado en el instante preciso, reduciendo los márgenes de error durante el proceso de clasificación.

2.4.5.1 Principales características técnicas [19]:

- Tensión de operación: 24 VDC ± 10 %

- Modo de control: señal de activación rápida (tipo KK).
- Tiempo de respuesta:
 - Apertura: < 1 ms
 - Cierre: < 1 ms
- Frecuencia máxima de operación: hasta 500 Hz.
- Caudal nominal (a 6 bar): hasta 180 Nl/min.
- Rango de presión operativa: entre 2 y 8 bar.
- Vida útil estimada: superior a 500 millones de ciclos.
- Grado de protección: IP62.
- Dimensiones reducidas (aprox. 46 × 46 mm), con un peso de 160–250 g según el modelo.
- Compatibilidad con señales PWM o digitales, lo que facilita su integración con microcontroladores y sistemas embebidos.

Figura 11

Válvula neumática para el sistema



Nota. Imagen tomada de la hoja técnica del componente TH-446, proporcionada por Songyu, s.f.

El modelo de válvula seleccionado se caracteriza por una arquitectura modular, que posibilita su implementación tanto en configuraciones de un solo canal como en arreglos con múltiples salidas. Esta cualidad resulta especialmente importante en sistemas escalables o en aquellos que requieren la sincronización de varios puntos de eyección.

La válvula ofrece una combinación equilibrada de velocidad de respuesta, estabilidad operativa y facilidad de montaje, lo que la hace apta para trabajar en procesos de clasificación de alta frecuencia sin comprometer la precisión. Asimismo, su capacidad de funcionar durante millones de ciclos sin necesidad de mantenimiento prolonga la vida útil del sistema y contribuye a la reducción de costos de operación.

Finalmente, su compatibilidad con estándares eléctricos comunes permitió conectarla directamente a un microcontrolador mediante una señal digital gestionada por software, sin requerir etapas adicionales de acondicionamiento.

2.5.5 Microcontrolador

Se decidió utilizar un microcontrolador de la familia ESP32 como elemento de enlace entre el sistema de visión y los actuadores neumáticos, debido a su adecuado balance entre capacidad de procesamiento, conectividad y flexibilidad en el manejo de interfaces digitales. Esta elección se fundamentó en su amplia incorporación dentro de proyectos de automatización industrial y de Internet de las Cosas (IoT), así como en la existencia de versiones compatibles con *Ethernet*, lo que facilitó su integración con la unidad de procesamiento encargada de la inferencia. De acuerdo con su documentación técnica, este microcontrolador fue concebido para ofrecer una plataforma confiable en aplicaciones de control de actuadores, gestión de comunicaciones y monitoreo remoto, gracias a su arquitectura modular y a la diversidad de interfaces que soporta [20].

2.5.5.1 Características destacadas [20]:

- Dispone de múltiples pines GPIO y soporte para señales PWM/UART, fundamentales para la activación de válvulas y el control de sistemas de iluminación.
- Presenta un ecosistema de desarrollo consolidado, con herramientas de programación y bibliotecas compatibles con diversos entornos, lo que facilita la implementación del firmware encargado de coordinar la cámara, las fuentes de luz y el subsistema de eyección.

Figura 12

Placa ESP32 empleada como microcontrolador.



La elección de estos componentes permitió garantizar el cumplimiento tanto de los requerimientos funcionales como de los no funcionales del sistema, asegurando su integración adecuada y un desempeño estable dentro del prototipo de clasificación. Esta selección facilitó el uso de elementos confiables, con disponibilidad de soporte técnico y adaptados a las condiciones de operación previstas, lo que refuerza la viabilidad y la sostenibilidad del diseño planteado.

2.6 Diseño Conceptual

En esta sección se expone el diseño conceptual del sistema, concebido para representar de manera estructurada la relación funcional entre los distintos módulos que lo conforman. Mediante un diagrama de bloques se describe la interacción de los subsistemas eléctricos, electrónicos y neumáticos, incorporando las fuentes de alimentación, los controladores y los dispositivos responsables de ejecutar la clasificación. Esta representación proporciona una visión integral del funcionamiento global del prototipo y constituye la base para los cálculos, las integraciones y las decisiones de ingeniería que se desarrollaron en etapas posteriores.

2.6.1 Diseño conceptual de los subsistemas del clasificador de granos de cacao

Figura 13

Esquema conceptual del sistema de captura de imágenes

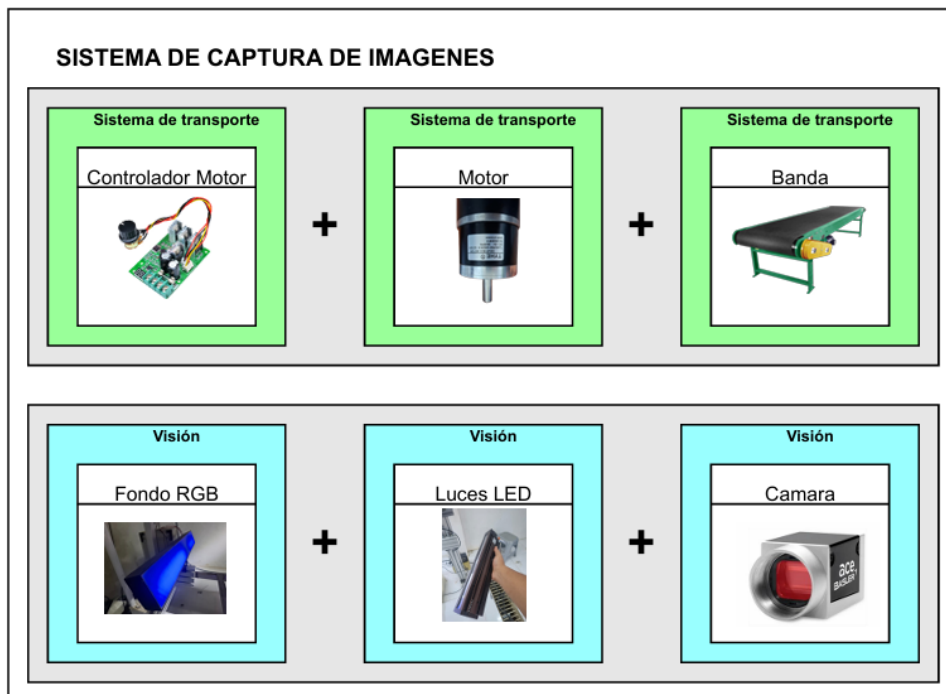


Figura 14

Esquema conceptual del sistema de adquisición e inferencia.

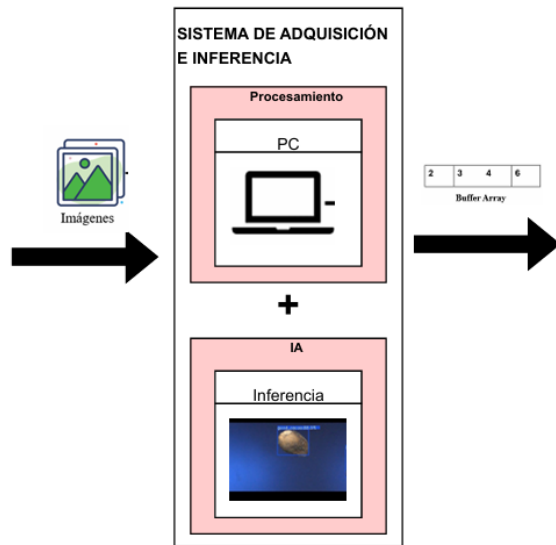


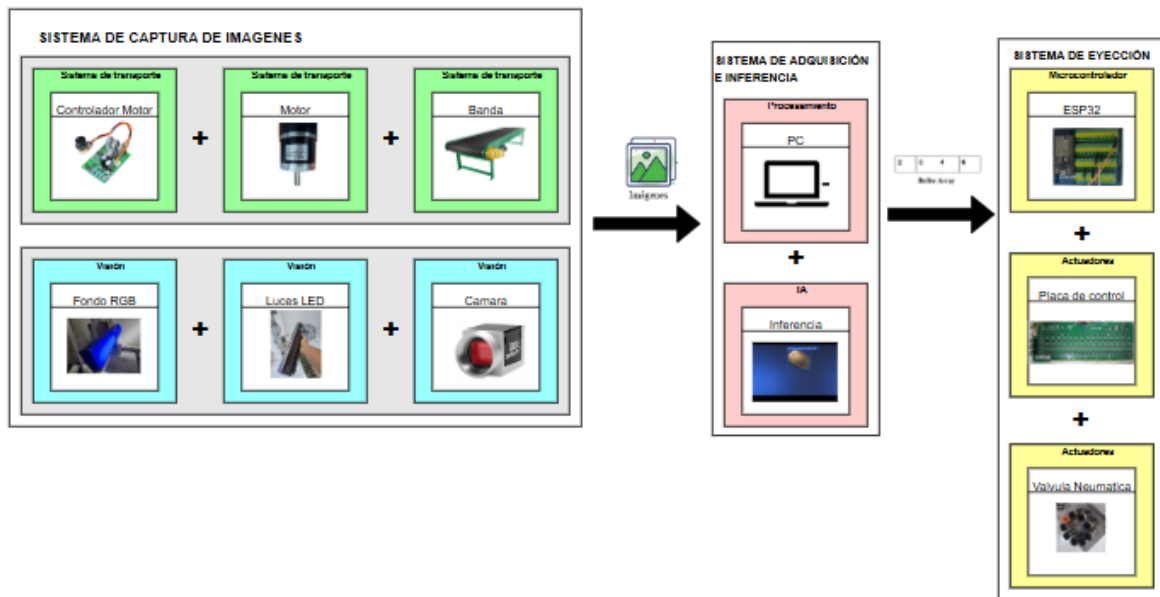
Figura 15

Esquema conceptual del sistema de eyección.



Figura 16

Esquema conceptual del sistema de clasificación de granos de cacao



El sistema propuesto se organiza en tres subsistemas principales. El primero es el sistema de captura de imágenes, conformado por el mecanismo de transporte de granos, la iluminación controlada y la cámara encargada de adquirir las imágenes. El segundo es el sistema de adquisición e inferencia, donde una computadora procesa la información capturada y aplica el modelo de inteligencia artificial entrenado para clasificar los granos. Finalmente, el sistema de eyección ejecuta la decisión de clasificación mediante un microcontrolador y actuadores neumáticos, permitiendo separar de forma automática los granos según la decisión del modelo.

2.7 Diseño básico de prototipo del sistema

La presente sección desarrolla la ingeniería básica del sistema, abordando los elementos necesarios para garantizar su correcta integración y funcionamiento. Se incluyen los cálculos generales que permiten estimar el consumo eléctrico total, determinar el diámetro de la manguera requerida para el sistema neumático de eyección y

estimar el tiempo de respuesta global del sistema. Además, se presenta el diagrama de bloques que describe la interconexión general de los subsistemas y el diagrama de comunicaciones que ilustra los protocolos utilizados entre los diferentes componentes.

Esta información proporciona una base técnica sólida antes de avanzar hacia el diseño al detalle, en el cual se precisan las conexiones específicas y la configuración física del prototipo.

2.7.1 *Cálculos técnicos del sistema*

Como parte del diseño básico del sistema se identificaron diversas variables críticas que requerían ser evaluadas previo a la implementación. Para este fin se establecieron expresiones matemáticas que permitieron estimar el consumo eléctrico de los distintos componentes y comprobar la idoneidad de los conductos neumáticos destinados al proceso de eyección. Dichas fórmulas facilitaron la selección adecuada de fuentes de alimentación, calibres de cables, mangueras y válvulas, asegurando de esta manera un funcionamiento estable y seguro del sistema en condiciones operativas.

2.7.1.1 **Estimación del consumo eléctrico total**

$$I_{Total} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{V_i} \quad (2.1)$$

I_{Total} : corriente total que debe suministrar la fuente [A].

P_i : potencia de cada componente conectado [W].

V_i : voltaje de operación del componente[V].

Esta fórmula permitió verificar que la corriente total requerida por cada conjunto de

dispositivos no superara la capacidad nominal de la fuente correspondiente. Además, fue útil para determinar el calibre adecuado de los conductores eléctricos y prever la disipación térmica esperada en condiciones de operación continua.

2.7.1.2 Selección de diámetro de la manguera para el sistema neumático

$$Q = C \times D^2 \times \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{L}} \quad (2.2)$$

Q: Caudal de aire

C: Constante empírica dependiente del tipo de gas y condiciones de temperatura.

D: Diámetro interno de la manguera.

P₁: Presión de entrada.

P₂: Presión de salida.

L: Longitud del tramo de manguera.

Aunque se trató de una estimación aproximada, esta ecuación permitió determinar que el diámetro interno mínimo de la manguera no debía ser inferior a cierto valor, para evitar caídas de presión que afectaran la eficiencia de eyección.

2.7.1.3 Estimación del tiempo de respuesta del sistema

$$T_{\text{respuesta}} = T_{\text{captura}} + T_{\text{procesamiento}} + T_{\text{comunicación}} + T_{\text{activación}} \quad (2.3)$$

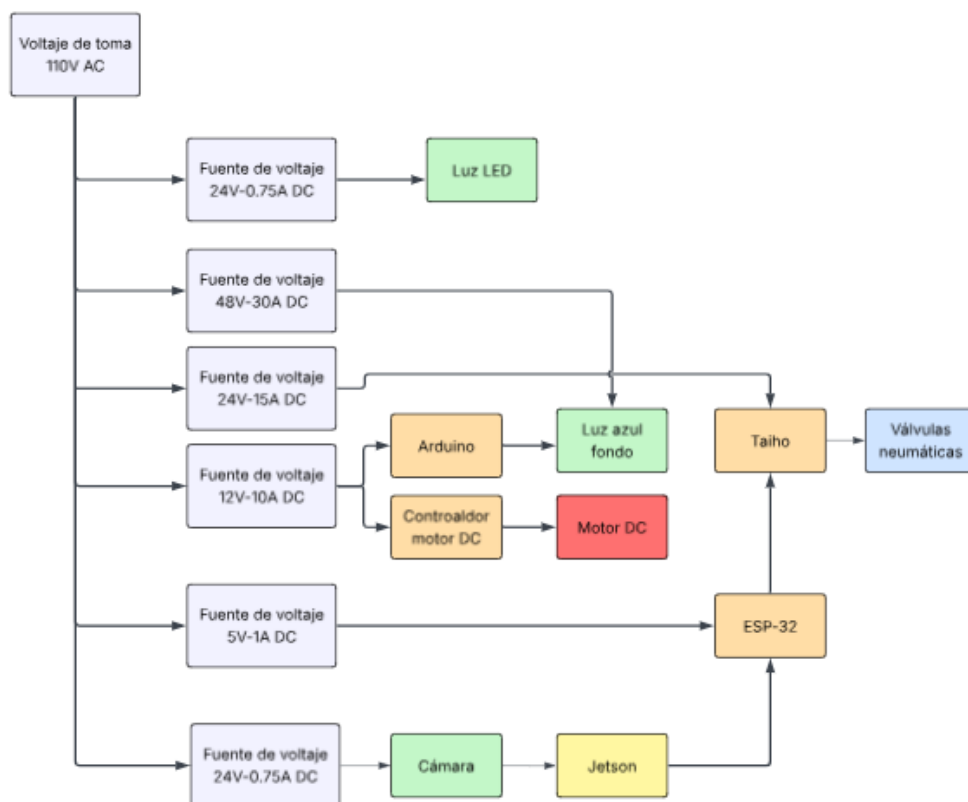
Cada elemento de dicha formula corresponde al tiempo que demora el sistema en efectuar cada una de las actividades descritas en el propio elemento.

Esta fórmula permitió definir el tiempo disponible entre la detección del grano y su llegada a la zona de eyección. Con ese valor, se estableció la distancia mínima que debía existir entre la cámara y la válvula para asegurar que el sistema tuviese el tiempo suficiente para decidir y actuar antes de que el grano pase la zona crítica. Estas relaciones garantizaron la correcta sincronización entre los módulos del sistema, evitando errores de clasificación por activaciones tardías o anticipadas.

2.7.2 Interconexión general del sistema

Figura 17

Arquitectura general del sistema de clasificación de granos de cacao



El sistema parte de una alimentación general de 110 V AC, la cual es derivada a múltiples fuentes de voltaje DC que suministraron energía a los diferentes módulos del

sistema. Entre ellas se encuentra una fuente de 24 V – 15 A, utilizada para alimentar al controlador Arduino, el sistema de eyección TAIHO y la iluminación del fondo, así como una fuente independiente de 48 V – 15 A, destinada específicamente a los focos LED de alta potencia, utilizados para la iluminación frontal del área de inspección. Para el control del motor de la banda transportadora, se incorporó una fuente de 12 V – 10 A, conectada a través de un controlador de velocidad vinculado al Arduino, que permitió ajustar la velocidad de desplazamiento del grano según las condiciones de prueba.

El sistema de visión se estructuró mediante una cámara industrial conectada a una *Jetson* (computadora de procesamiento). Esta arquitectura permitió ejecutar el modelo de detección, tomar decisiones en tiempo real y enviar comandos hacia el ESP32, microcontrolador encargado de coordinar la activación de la tarjeta *TAIHO* y, por consiguiente, la apertura de las válvulas neumáticas. Por su parte, el ESP32 recibió alimentación mediante una fuente de 5 V – 1 A, suficiente para operar de forma estable junto con los periféricos conectados. El microcontrolador también gestionó la modulación PWM hacia las luces LED RGB o blancas según el tipo de ensayo.

La cámara contó con una fuente independiente de 24 V – 0.75 A, adaptada según los requerimientos del fabricante. Todos los elementos eléctricos fueron montados en un sistema de distribución protegido, con fusibles y conexiones protegidas para evitar sobrecargas y garantizar la seguridad del prototipo.

2.7.3 Sistema de comunicaciones del prototipo

2.7.3.1 Comunicación entre el sistema de visión y la unidad de procesamiento

Figura 18

Enlace Ethernet de 10 Gb entre la cámara de área y la computadora del sistema.

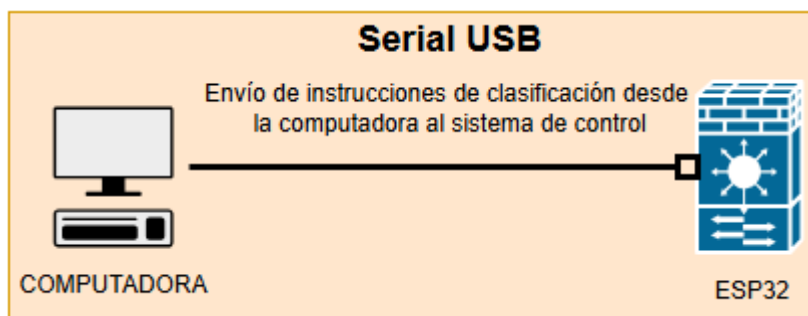


La cámara de área se comunica con la unidad de procesamiento mediante una conexión Ethernet de 10 Gigabits por segundo (10 GbE), lo que permite la transmisión de imágenes en alta resolución y en tiempo real hacia la computadora. Este enlace garantiza el ancho de banda necesario para cumplir con los requerimientos del sistema de visión artificial, asegurando que cada grano de cacao sea capturado con nitidez y procesado sin demoras.

2.7.3.2 Comunicación entre la unidad de procesamiento y el sistema de control

Figura 19

Enlace serial USB entre la computadora y el microcontrolador ESP32



La decisión de clasificación generada por el sistema de visión es transmitida desde la computadora al microcontrolador ESP32 mediante un enlace serial a través de puerto USB. Esta comunicación permite enviar instrucciones binarias al sistema de eyección, en función

del resultado del modelo de inferencia. El uso de una conexión USB facilita la integración entre el entorno de procesamiento y el controlador del sistema, garantizando una transferencia de datos sencilla y de baja latencia.

2.7.3.3 Comunicación entre el sistema de control y la unidad de activación neumática

Figura 20

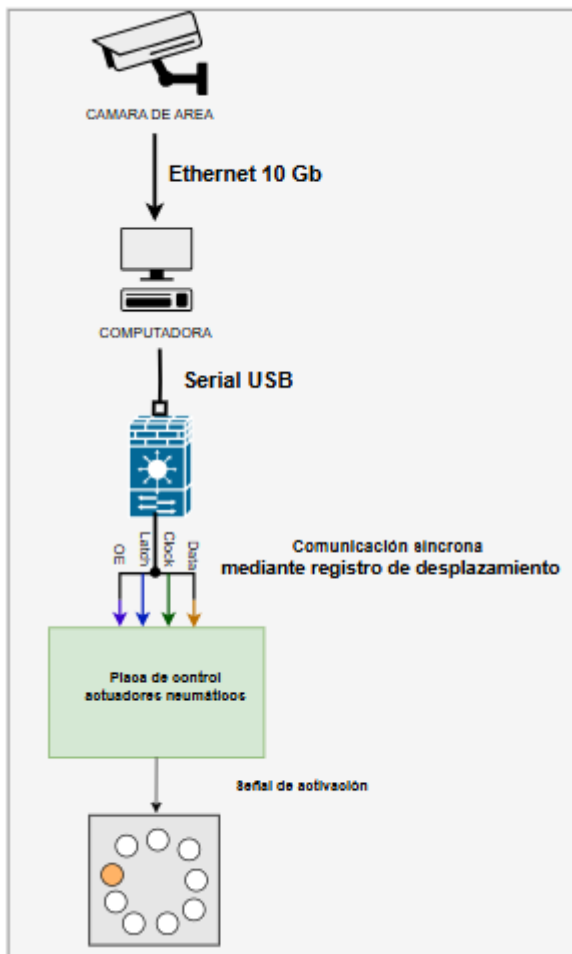
Comunicación entre el ESP32 y la unidad de activación neumática a través de señales digitales



El sistema de control, representado por el microcontrolador ESP32, se comunica con la placa de control de válvulas mediante un conjunto de señales digitales sincronizadas (*clock*, *latch*, *data* y *output enable*). Esta placa actúa como interfaz intermedia, interpretando las señales recibidas y activando las electroválvulas correspondientes en función del patrón enviado. Este esquema permite gestionar múltiples salidas de forma eficiente y con alta precisión temporal, garantizando una respuesta adecuada del sistema de eyección.

Figura 21

Arquitectura general de comunicaciones del sistema de clasificación



La Figura 21 presenta una visión global del sistema de comunicaciones implementado en el prototipo. Se representa el flujo de datos desde la captura de imágenes mediante la cámara de área, conectada a la computadora por medio de un enlace Ethernet de 10 Gb, hasta la activación final de las válvulas neumáticas. La computadora transmite las decisiones de clasificación al microcontrolador ESP32 mediante un enlace serial USB, y este, a su vez, envía las señales de control hacia la placa encargada de activar las electroválvulas, utilizando un esquema de registro de desplazamiento con sincronización por reloj.

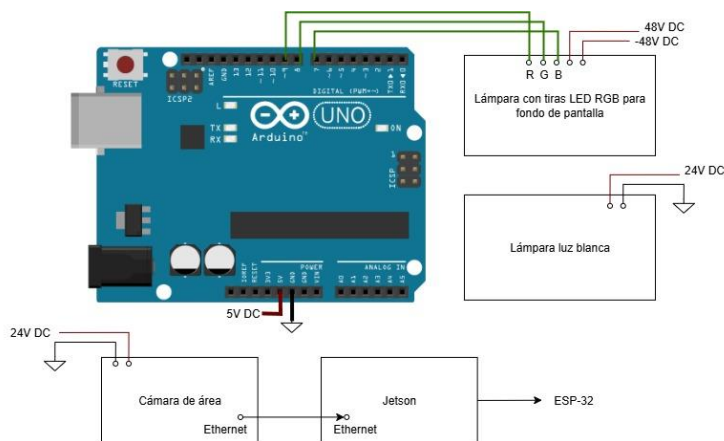
2.8 Diseño al detalle del prototipo del sistema

En esta sección se presentan los detalles constructivos del prototipo, incluyendo los diagramas esquemáticos de conexión entre los diferentes componentes, el ensamble general y la lista completa de materiales utilizados. La información mostrada permite comprender la integración física del sistema y sirve como referencia para su replicación, mantenimiento o futuras mejoras.

2.8.1 Diagramas eléctricos de los principales subsistemas del prototipo

Figura 22

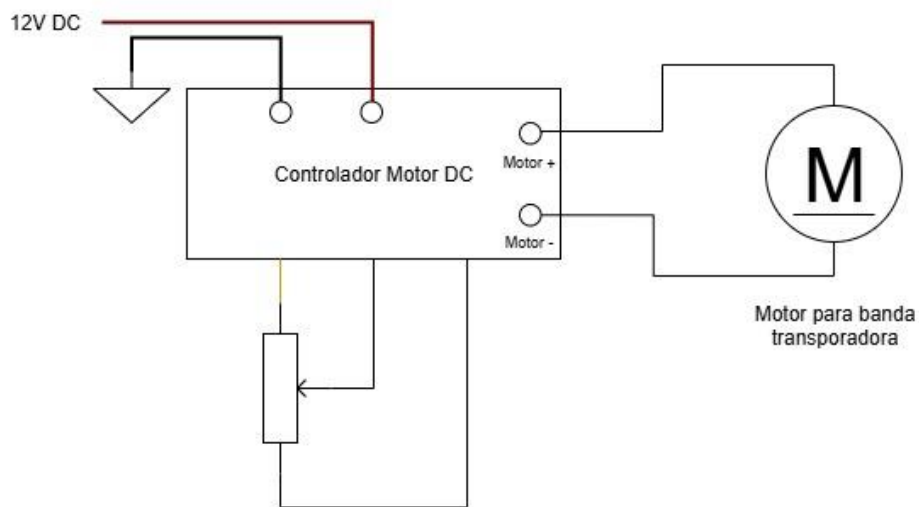
Diagrama de subsistema de captura de imágenes e iluminación.



La Figura 22 describe las conexiones realizadas para el subsistema de captura de imágenes, como se aprecia, tenemos 3 secciones diferentes, de arriba a abajo, la primera describe las conexiones necesarias para el fondo RGB dictada por el código del Arduino y el voltaje al que trabajan, la segunda describe que la luz led simplemente se conecta con su respectiva fuente, y en la tercera se tiene la conexión entre la cámara de área y la PC para el procesamiento de imágenes.

Figura 23

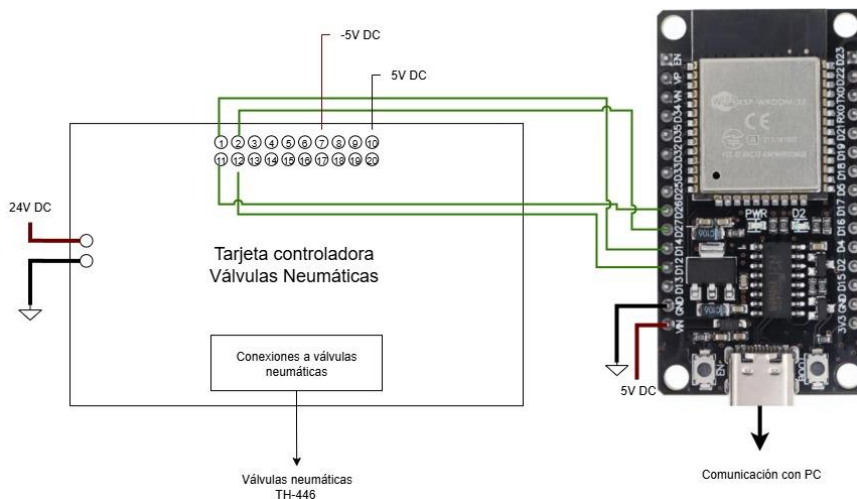
Diagrama de subsistema de transporte.



La figura 23 describe simplemente las conexiones para el sistema de transporte, el cual consiste en el motor DC con su respectivo controlador, la velocidad estará controlada por un potenciómetro y como característica se observa que el motor trabaja en 12V.

Figura 24

Diagrama de subsistema de clasificación y eyección.



En la Figura 24 observamos la tarjeta principal para el control de las electroválvulas y su conexión con la ESP-32, la cual dicta qué válvula será accionada para la eyección del grano

en mal estado, es decir, la posición que se debe accionar. La tarjeta trabaja con un voltaje de 24V.

2.8.2 Evaluación de modelos de detección

Para determinar la arquitectura de visión artificial más adecuada al sistema de clasificación de granos de cacao, se llevó a cabo una serie de pruebas experimentales en una plataforma embebida de alto rendimiento. Estas evaluaciones se realizaron sobre un dispositivo NVIDIA, aprovechando sus capacidades de cómputo en el borde y su aceleración por GPU.

El proceso consistió en seleccionar dos modelos representativos de la literatura: *NanoDet*, como ejemplo de arquitectura ligera enfocada en escenarios con recursos restringidos, y *YOLO-NAS* en su variante *Small*, como propuesta moderna optimizada mediante técnicas de *Neural Architecture Search*. Esta elección permitió contrastar un modelo de baja demanda computacional frente a uno diseñado para aprovechar al máximo el hardware disponible, comparando su idoneidad en un entorno de tiempo real.

El conjunto de datos utilizado estuvo conformado por aproximadamente 5 000 imágenes de granos de cacao, anotadas en formato *YOLO TXT*. El esquema incluyó dos clases principales (cacao bueno y cacao malo) y una clase de fondo, con el fin de simular condiciones reales de clasificación binaria. Las etiquetas se generaron mediante un procedimiento mixto: una etapa inicial de anotación automática con *Grounding DINO*, ejecutada en la propia Jetson, seguida de una validación y corrección manual que garantizó la calidad del dataset. Este flujo de trabajo permitió reducir significativamente el tiempo de preparación, evitando la conversión al formato COCO y manteniendo la coherencia con las necesidades del proyecto.

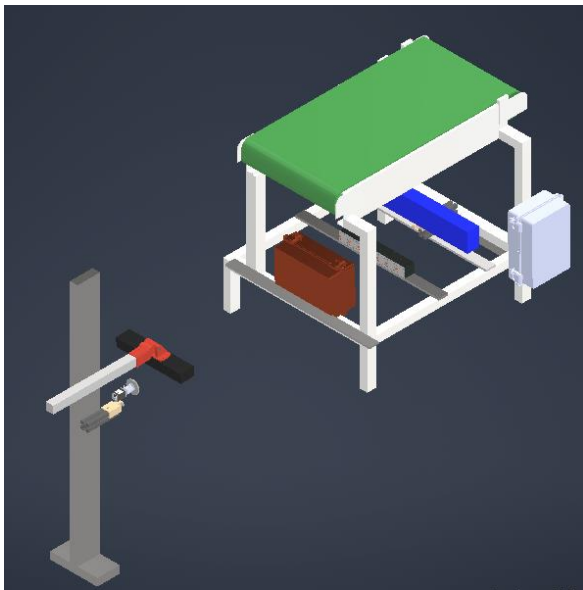
NanoDet fue entrenado con imágenes de 320 píxeles, mientras que YOLO-NAS-S trabajó con entradas de 640 píxeles, ajustándose a la configuración habitual de la familia YOLO.

Para las pruebas se fijó un límite superior de 150 FPS, correspondiente a la capacidad máxima del pipeline de la Jetson. Se midieron las métricas de latencia promedio por cuadro, rendimiento en FPS y estabilidad durante ejecuciones prolongadas. Además, se consideraron factores prácticos como el uso de memoria en inferencia, la complejidad del posprocesamiento y la facilidad de exportación a diferentes formatos. Los resultados metodológicos se organizaron en tablas para facilitar la comparación y se encuentran en el apéndice F.

2.8.3 Ensamblaje en software CAD de los diferentes componentes que conforman el sistema.

Figura 25

Ensamble general del prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao.



La Figura 25 presenta el diseño del montaje del prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao. El núcleo del conjunto está formado por una banda transportadora

montada sobre una estructura metálica, encargada de desplazar los granos a la zona de inspección de manera controlada y estable.

En la parte posterior de la banda, se instalan perfiles de aluminio que sostienen el fondo, el cual proporciona un contraste óptico adecuado para el proceso de captura de imágenes. Adicionalmente, se dispone de una segunda estructura frontal, también construida con perfiles de aluminio, que soporta el sistema de iluminación LED y la cámara de visión artificial, asegurando una correcta alineación y un campo de visión estable durante la operación. En la zona inferior de la estructura principal se localizan dos tableros: uno destinado a las placas de control del sistema neumático, responsables de la activación de las electroválvulas de eyección, y otro que alberga las diferentes fuentes de alimentación requeridas por el prototipo. Este diseño modular no solo permite un montaje ordenado y funcional de los subsistemas, sino que también facilita su mantenimiento, calibración y futuras modificaciones.

2.8.4 Lista de materiales del prototipo del sistema

La Tabla 2 presenta la lista de materiales empleados en la construcción del prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao. En ella se incluyen los componentes principales, sus características más relevantes y la cantidad utilizada de cada uno, con el fin de facilitar la replicación y el mantenimiento del sistema.

Tabla 2

Lista de materiales del prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao.

N.º	Descripción	Cantidad	Características principales
1	Banda Transportadora	1	90 x 18,5 [cm]
2	Tablero Eléctrico	2	39 x 29 x 16 [cm]
3	Cámara	1	Sensor de área, Máximo 150 fps, 1936 x 1200 px
4	Perfiles de aluminio	1	
5	Fuente de alimentación	3	AC/DC 48 [V] 20 [A], AC/DC 12 [V] 20[A], AC/DC 5 [V] 10[A], 24 [V] 15[A]
6	Arduino	1	
7	Esp32	1	
8	Controlador de velocidad	1	12 V 20[A]
9	Motor DC	1	Tipo servo 12 [V] 5 [A]
10	Placas RGB	4	Alimentación de 48 [V]
11	Luz Led	1	Fuente de poder integrado de 24 [V] 12 [A]
12	Placa de control de válvulas	1	Trabaja a 24 [V] para la parte de potencia y 5 [V] la parte de control
13	Válvulas Neumáticas	7	Se activa con 24 [V] y soporta una presión máxima de 8 [Bar]

Nota. La información presentada proporciona un registro ordenado de los componentes utilizados en el prototipo, lo que facilita su mantenimiento, reposición de piezas y posibles mejoras futuras del sistema.

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

En el presente capítulo se presentarán los resultados de desempeño integral del clasificador, para lo cual se realizaron campañas de ensayos específicas sobre cada subsistema crítico: transporte, iluminación, captura (cámara) y eyección. El objetivo fue verificar que cada módulo cumple lo definido en el Capítulo 2 (requerimientos funcionales y no funcionales; arquitectura eléctrica, neumática y de comunicaciones), cuantificar sus parámetros de desempeño y caracterizar sus límites operativos. Esta estrategia permite, además, vincular los resultados medidos con los supuestos de diseño, el dimensionamiento de mangueras neumáticas (2.2), el consumo total (2.1) y, sobre esa base, cerrar tolerancias y márgenes antes de la integración completa. Para cada resultado obtenido se realizaron pruebas en donde se garantizaron condiciones controladas: iluminación ambiental constante, presión neumática estabilizada, fuente de alimentación estable, y una sola fila de granos sobre la banda, según el diseño metodológico del Capítulo 2.

3.1.1 Subsistema de transporte banda y accionamiento

El subsistema de transporte se evaluó con el objetivo de verificar que la banda permita trasladar granos de cacao de forma continua y ordenada, simulando una línea de producción real, y que cuente con velocidad regulable para sincronizar adecuadamente la captura de imágenes y las pruebas de eyección. Para ello se utilizó la banda descrita en el diseño, compuesta por una estructura de laboratorio accionada por un motor DC de 12 V y un controlador de velocidad mediante potenciómetro, manteniendo las condiciones de alimentación y montaje previstas.

Figura 26

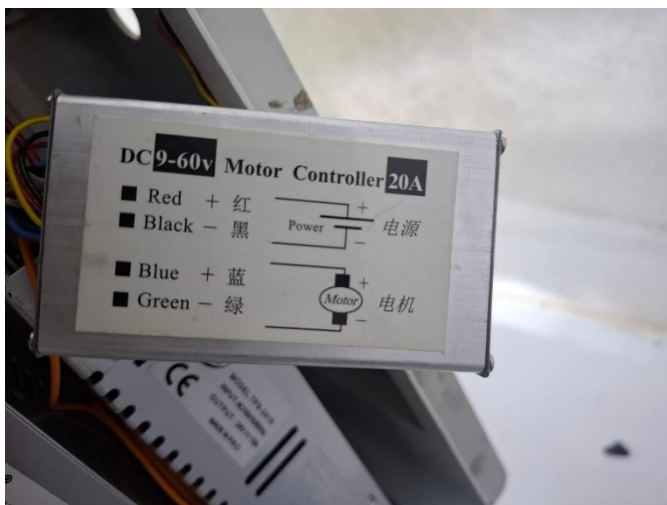
Banda transportadora de granos de cacao.



Las pruebas consistieron en colocar granos de cacao sobre la banda en disposición lineal y realizar corridas con diferentes posiciones del potenciómetro, comprobando en cada ajuste la variación efectiva de la velocidad y la continuidad del desplazamiento.

Figura 27

Controlador utilizado para variar la velocidad de la banda transportadora por medio de un potenciómetro.



Con apoyo de marcas de referencia en la banda y un cronómetro se confirmó la regulación de la velocidad sin necesidad de instrumentación adicional, y se identificó un rango de operación que permite seleccionar un punto de trabajo compatible tanto con la exposición de la cámara (evitando borrosidad apreciable) como con el tiempo de actuación del sistema de eyección. Durante todos los ensayos se verificó visualmente que los granos avanzaran en fila y sin interrupciones al atravesar la zona de inspección.

Los resultados mostraron un transporte continuo y estable, sin atascos ni pérdidas de tracción en las condiciones nominales. El control de velocidad por potenciómetro funcionó conforme a lo esperado y ofreció un rango útil para la integración con el sistema de visión y la activación neumática en la zona de rechazo. La disposición en fila se mantuvo a lo largo de las corridas, lo que facilitó la captura ordenada de imágenes y la correspondencia temporal entre la detección y la eyección, sin presentarse comportamientos que comprometieran la operación.

Figura 28

Prueba de transporte de granos realizadas en el prototipo.



3.1.2 Subsistema de iluminación: fondo RGB y luz LED blanca

En continuidad con el transporte de granos, el siguiente subsistema evaluado fue el de iluminación. Las pruebas realizadas fueron satisfactorias, logrando el propósito de garantizar un campo visual homogéneo, estable y reproducible sobre la zona de inspección, de modo que las imágenes capturadas permitieran diferenciar con claridad el contorno y la superficie de los granos. Para ello se dispuso de dos fuentes complementarias: un fondo RGB de 48 V, empleado para modular el contraste entre el grano y el plano de referencia, y una luz blanca frontal de 24 V con control por PWM, destinada a reforzar la iluminación directa sin alterar la temperatura de color. Ambas luminarias fueron montadas en **soportes** impresos en 3D y luego puestas con facilidad sobre la estructura metálica del sistema, además, se aseguró rigidez, repetibilidad de la posición y un ángulo de incidencia acorde con el campo de visión de la cámara.

Figura 29

Diseño CAD del soporte para montaje de la luz LED Blanca

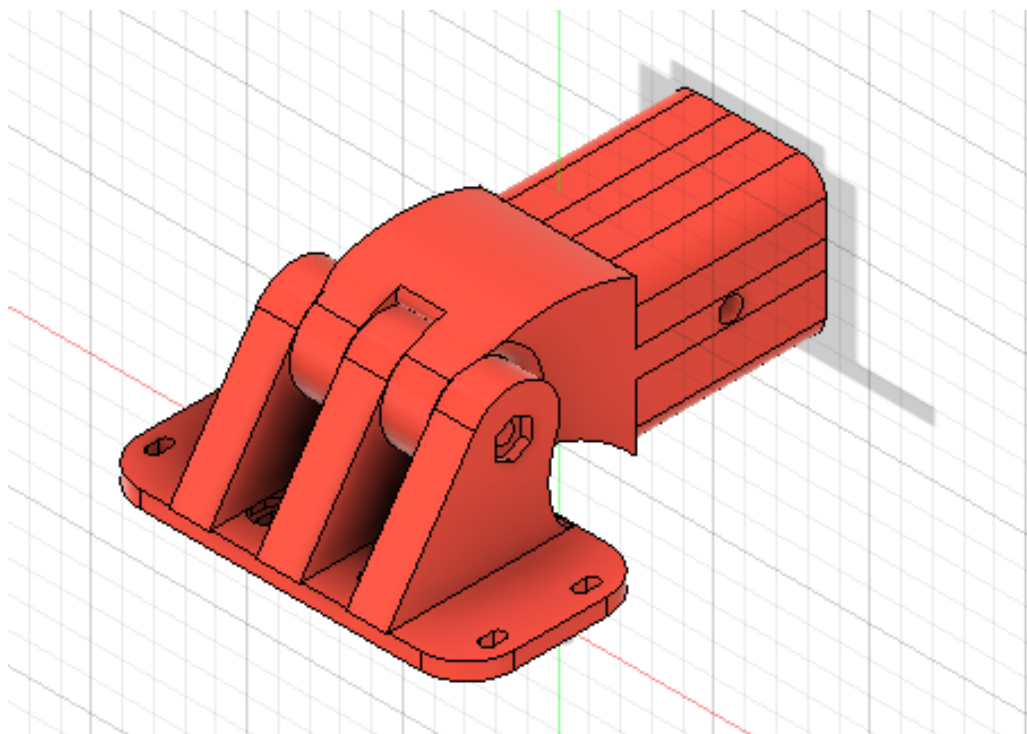
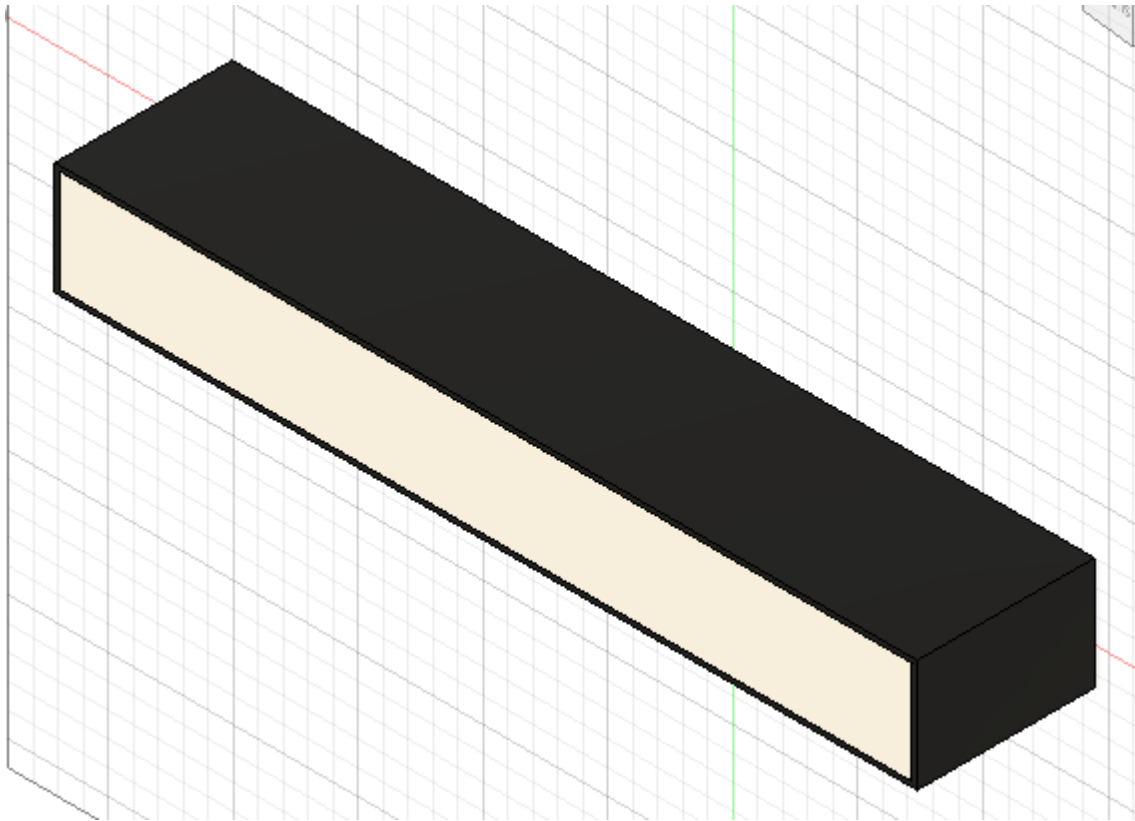


Figura 30

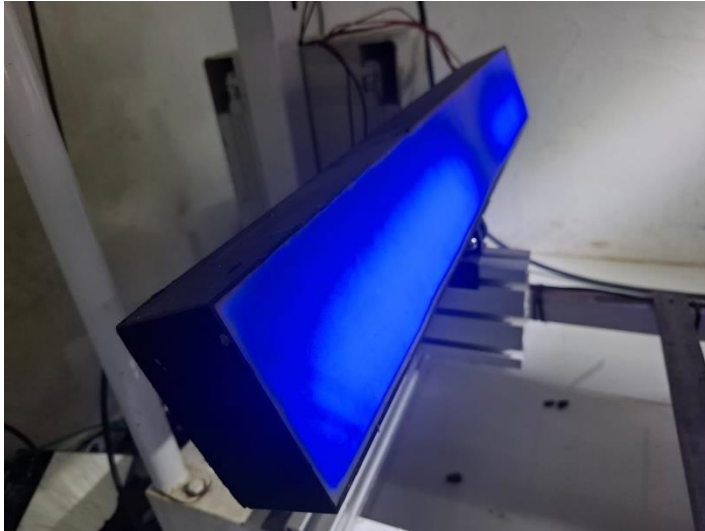
Diseño CAD del fondo RGB del sistema.



La instalación mantuvo el fondo RGB alineado con la banda, detrás de la trayectoria de los granos, y la luz blanca en la parte frontal, con un ángulo raso para reducir reflejos especulares hacia el sensor. El control del fondo se realizó mediante las tres líneas independientes de los canales R, G y B, lo que permitió ajustar la tonalidad del plano de referencia hasta obtener una separación visual nítida respecto del color del cacao, dando como resultado el código (0, 0, 255) dejando el fondo en una tonalidad azul.

Figura 31

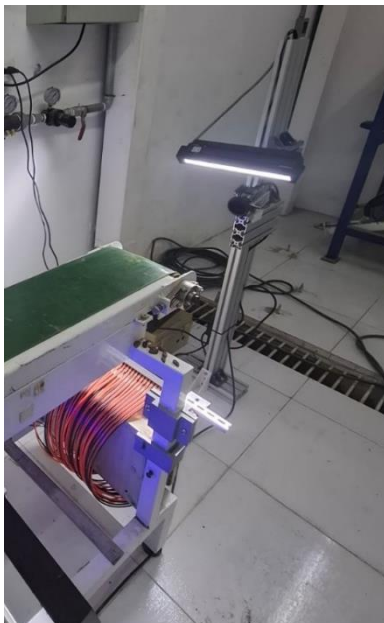
Fondo RGB montado en la estructura del prototipo.



La luz blanca se controla por señal PWM desde el controlador, lo que facilitó fijar un nivel de brillo estable y evitar sobreexposiciones en zonas de alto relieve del grano, todos estos ajustes se los debe realizar de forma manual y visual, hasta encontrar los parámetros adecuados para tu aplicación y dejarlos preestablecidos.

Figura 32

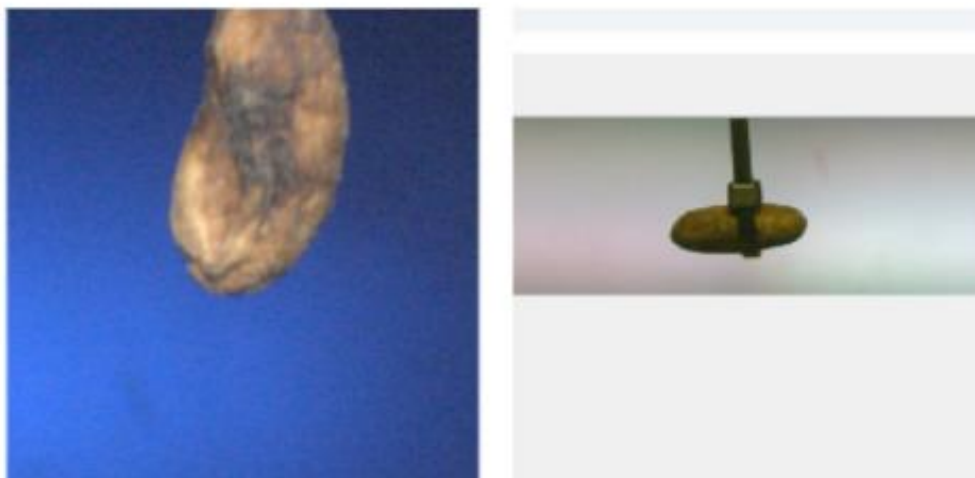
Luz LED Blanca montada en la estructura del prototipo.



Las pruebas consistieron en capturar secuencias de imágenes variando, de forma ordenada, la mezcla de color del fondo y la intensidad de la luz frontal, verificando visualmente la uniformidad del campo, la ausencia de sombras marcadas y la legibilidad del borde del grano. Se confirmaron condiciones de trabajo en las que el fondo mantiene una luminancia constante en toda el área útil y la luz frontal aporta detalle sin producir destellos hacia la cámara. En este proceso se identificó una combinación de tonalidad del fondo y nivel de frontal que ofrece buen contraste para la segmentación y evita pérdida de textura; esa configuración quedó establecida como punto de operación para las siguientes etapas de captura y clasificación.

Figura 33

Comparación visual de un grano de cacao con iluminación controlada RGB+LED versus iluminación convencional.



Nota. En la imagen de la izquierda se observa un grano de cacao iluminado con fondo RGB y luz LED blanca, lo que permite resaltar las características visuales y la textura de la superficie. En contraste, en la imagen de la derecha, al no contar con esta iluminación controlada, el grano se percibe opaco y con menor definición, dificultando la apreciación de sus rasgos.

Como resultado, el subsistema de iluminación cumple su cometido: proporciona un fondo controlado y una iluminación frontal estable que, en conjunto, aseguran imágenes claras, con contornos definidos y sin variaciones apreciables durante las corridas. La inclusión de soportes impresos en 3D permitió fijar de forma fiable la geometría de la iluminación y facilitar ajustes finos de orientación cuando fue necesario. De esta forma, el esquema implementado garantiza condiciones de iluminación reproducibles, cumpliendo con la metodología establecida y siendo coherente con los requerimientos del sistema de visión, creando una base sólida para la captura de imágenes y las pruebas de eyección realizadas posteriormente.

3.1.3 Subsistema de captura de imágenes (cámara de área)

Una vez garantizada la iluminación homogénea, se procedió a evaluar el subsistema de captura de imágenes. Los resultados obtenidos aseguraron que la cámara de área este proporcionando imágenes nítidas y consistentes de los granos al pasar por la zona de inspección, sin distorsiones por movimiento y con un encuadre estable. Para ello, la cámara se montó de forma rígida sobre la estructura prevista en el diseño, con el eje óptico alineado a la banda y a la geometría de iluminación definida previamente. La configuración de adquisición se ajustó siguiendo criterios prácticos: uso de obturador global, definición de una región de interés (ROI) centrada sobre el carril de paso y selección de una tasa de cuadros alta, a fin de capturar cada grano dentro de la ventana temporal disponible.

A continuación, se resumen los parámetros efectivos de la cámara utilizados en operación. Todos fueron determinados de manera experimental, con el objetivo específico de resaltar la superficie y las características visuales de cada grano bajo las condiciones de iluminación y velocidad de banda del prototipo:

Tabla 3

Parámetros establecidos en la cámara para una buena captura de imágenes

PARÁMETRO	VALOR	PROPÓSITO
<i>WIDTH</i>	1316 px	Ancho del ROI. Reduce datos transferidos y latencia, manteniendo solo el carril útil.
<i>HEIGHT</i>	260 px	Alto del ROI. Centrado sobre la zona de inspección para cubrir el paso del grano sin área ociosa.
<i>OFFSET_X</i>	236 px	Desplazamiento horizontal del ROI respecto al origen del sensor; alinea el carril con el FOV.
<i>OFFSET_Y</i>	600 px	Desplazamiento vertical del ROI; fija la franja de captura sobre el plano de inspección.
<i>PÍXEL_FORMAT</i>	BGR8	Formato de 8 bits por canal; suficiente para la etapa de inferencia y compatible con la canalización de visión.
<i>BALANCE_RED</i>	1.5	Balance de blancos: realza matices rojizos de la cáscara para mejorar separación con fondos verdosos/cian.
<i>BALANCE_BLUE</i>	1.5	Balance de blancos: incrementa componente azul para favorecer contraste espectral del fondo.
<i>BALANCE_GREEN</i>	0.8	Balance de blancos: modera el verde para evitar dominancias en el histograma y mantener naturalidad del grano.
<i>EXPOSURE_TIME</i>	300	Tiempo de exposición corto para limitar “ <i>motion blur</i> ”.
<i>FPS</i>	300	Alta cadencia para capturar el tránsito del grano dentro de la ventana temporal disponible.
<i>GAMMA</i>	0.9	Ajuste de curva tonal: comprime luces y levanta sombras suaves para resaltar textura superficial.

GAIN	18	Ganancia moderada para sostener SNR con exposición breve, evitando ruido excesivo.
-------------	----	--

Nota. La combinación ROI reducido + exposición corta + 300 FPS es la que permitió fijar un flujo de cuadros con baja latencia efectiva, contornos definidos y una textura suficientemente rica para la etapa de análisis. Si cambian la iluminación, la velocidad de banda o el fondo, estos parámetros deben recalibrarse siguiendo el mismo criterio experimental.

Las pruebas consistieron en registrar secuencias a diferentes combinaciones de velocidad de banda, cuadros por segundo y tiempo de exposición, manteniendo la ganancia en niveles bajos para preservar el detalle. En cada ajuste se verificó visualmente la ausencia de borrosidad perceptible en el borde del grano, la correcta delimitación del contorno sobre el fondo y la uniformidad de la iluminación dentro del encuadre. Asimismo, se comprobó que el ROI cubra únicamente el área útil, lo que mejora la estabilidad de la captura y reduce el tiempo de transferencia de cada cuadro hacia el equipo de procesamiento. Con este procedimiento se identificó un punto de operación que equilibra exposición corta (para evitar arrastre por movimiento) con un nivel de señal suficiente, aprovechando el esquema de iluminación establecido. Los resultados mostraron que la cámara mantuvo una captura estable y repetible en las condiciones nominales del prototipo: las imágenes presentan contornos definidos, textura visible en la superficie del grano y ausencia de artefactos atribuibles a la sincronización con la banda.

Figura 34

Resultado captura de imágenes “Cacao – Bueno”



Figura 35

Resultado captura de imágenes “Cacao – Malo



La configuración de trabajo seleccionada resultó adecuada para alimentar el modelo de inferencia sin introducir retrasos apreciables en el flujo de datos, por lo que, el subsistema de captura cumple su cometido: entrega imágenes claras y consistentes, coherentes con los requerimientos del sistema de visión, y estableció una base confiable para los resultados que se obtuvieron de la fase de eyección y clasificación.

3.1.4 Subsistema de inferencia mediante visión artificial

Una vez establecida la etapa de captura de imágenes, se procedió a la implementación del subsistema de inferencia, encargado de procesar los cuadros adquiridos y emitir la decisión de clasificación en tiempo real. Para este propósito se empleó el modelo *YOLO-NAS* en su variante *S (Small)*, el cual combinó la robustez de las arquitecturas modernas de detección con la optimización automática de hiperparámetros estructurales.

Durante la etapa de implementación se optó por imágenes de 640 px de resolución de entrada, aprovechando la capacidad de procesamiento de la plataforma *Jetson AGX Orin* (64 GB). El modelo se ejecutó en formato optimizado *TensorRT* FP16, lo que permitió alcanzar tasas de inferencia cercanas a 110 FPS, situándose dentro del rango de tiempo real y con un margen suficiente para etapas adicionales de posprocesamiento. En contraste, la versión base en *PyTorch* registró un rendimiento aproximado de 12 FPS, confirmando la importancia de la optimización hacia *TensorRT* para aplicaciones en el borde. La Tabla 3.2 resume los

parámetros de inferencia adoptados en el prototipo:

Tabla 4

Parámetros de inferencia del subsistema de visión.

Parámetro	Valor / Configuración	Justificación
Modelo	YOLO-NAS-S	Balance entre precisión y velocidad, optimizado por búsqueda NAS.
Resolución de entrada	640 px	Permite capturar textura y defectos sutiles en los granos.
Dataset	~5.000 imágenes, 2 clases + fondo	Cobertura representativa de granos buenos y defectuosos.
Plataforma de despliegue	<i>Jetson AGX Orin</i> 64 GB	Computación en el borde con aceleración GPU.
Motor de inferencia	<i>TensorRT</i> FP16	Reducción de latencia y aprovechamiento de hardware embebido.
Tasa de cuadros efectiva	~110 FPS (límite de prueba: 150 FPS)	Inferencia en tiempo real con holgura operativa.
Latencia promedio	~9 ms por cuadro	Compatible con la sincronización del sistema de eyección.

En las pruebas controladas, el subsistema de inferencia logró identificar de manera confiable las dos clases definidas, resaltando contornos y regiones características de los granos. La precisión alcanzada superó el umbral del 90 % en condiciones de iluminación y

velocidad nominales, lo que asegura un nivel de desempeño adecuado para la clasificación en línea. Las Figuras 36 y 37 muestran una prueba realizada de la salida del modelo durante la operación de inferencia, donde se aprecia la correcta detección de granos categorizados como “cacao bueno” y “cacao malo” en tiempo real.

Figura 36 Resultado de inferencia YOLO-NAS: granos de cacao clasificados como buenos.



Figura 37 Resultado de inferencia YOLO-NAS: granos de cacao clasificados como defectuosos.



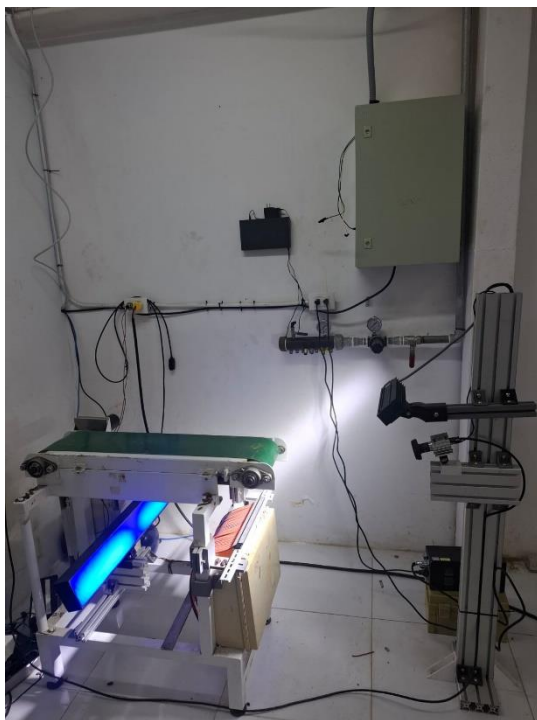
Así, el subsistema de inferencia basado en YOLO-NAS-S ejecuta la clasificación en tiempo real con alta precisión y baja latencia, demostrando un desempeño robusto, confiable y asegurando que el modelo opere de manera estable bajo las condiciones nominales de iluminación y velocidad del prototipo.

3.1.5 Subsistema de eyección e integración de otros subsistemas

El desempeño del subsistema de eyección se evaluó en condiciones de operación conjunta, es decir, con todos los subsistemas activos y sincronizados: transporte de granos, iluminación, captura de imágenes, inferencia y activación neumática. De esta manera fue posible analizar el funcionamiento integral del clasificador, verificando no solo la respuesta de las válvulas, sino también la coordinación de todo el flujo de procesamiento.

Figura 38

Prototipo del sistema de clasificación de granos de cacao en operación con todos los subsistemas integrados.

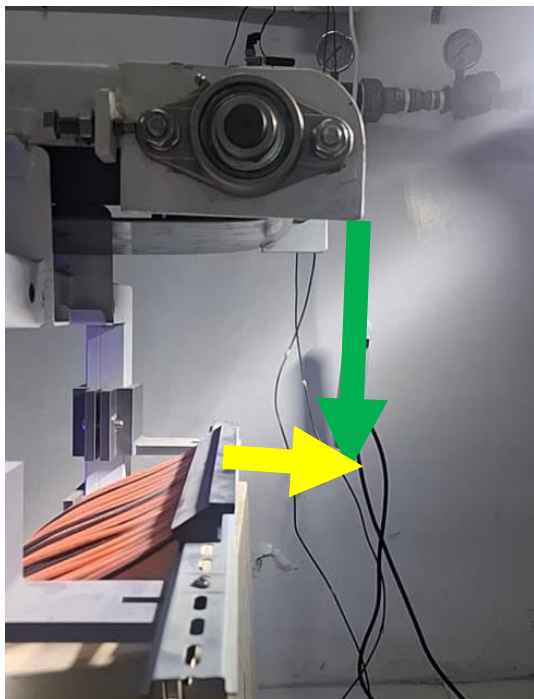


El análisis del subsistema permitió verificar su capacidad para separar de manera confiable los granos defectuosos identificados en la etapa de visión artificial. Durante las pruebas se constató que las válvulas neumáticas Matrix TH-446 respondieron con una latencia prácticamente imperceptible, inferior a 1 ms, lo que aseguró la expulsión precisa de los granos dentro de la ventana de tiempo disponible entre la detección y el paso por la zona de descarte. Al evaluar la presión de trabajo, se determinó que entre 6 y 7 bar es un valor

óptimo para el funcionamiento del prototipo: suficiente para desviar el grano hacia el canal de rechazo sin generar rebotes o trayectorias inestables. Asimismo, la alineación de las boquillas con la trayectoria de la banda evitó perturbaciones en los granos adyacentes, lo cual redujo el número de expulsiones erróneas.

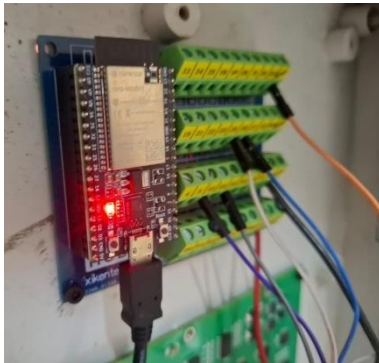
Figura 39

Alineación de las boquillas de salida de aire con la trayectoria que seguirían los granos sobre la banda.



En términos de estabilidad, la tarjeta de control demostró capacidad para gestionar múltiples válvulas de forma simultánea, lo que confirma la escalabilidad del sistema. Esta característica resulta relevante en escenarios de mayor flujo de producto, donde la expansión del número de canales de eyección podría ser necesaria.

Figura 40 Tarjeta de control conectada al ESP32 para la activación de válvulas.



Para evaluar el desempeño del subsistema de eyección se realizaron diez pruebas controladas colocando secuencias de granos de cacao buenos (B) y defectuosos (M) sobre la banda transportadora. El objetivo fue verificar que el sistema expulsara de manera selectiva los granos defectuosos en sincronía con la decisión generada por el modelo de inferencia.

En las primeras ocho pruebas, donde los granos fueron dispuestos en fila de manera ordenada, los resultados evidenciaron un desempeño consistente. El sistema clasificó correctamente la gran mayoría de secuencias, alcanzando una efectividad superior al 90 % de aciertos. Se registraron únicamente dos casos de error:

- En la **prueba 3**, un grano defectuoso fue catalogado como bueno.
- En la **prueba 5**, dos granos defectuosos fueron omitidos en la expulsión.

Estos errores, aunque puntuales, se atribuyen principalmente a pequeñas variaciones en la posición y orientación de los granos al momento de la captura, lo que afectó la decisión de inferencia y, en consecuencia, la activación de la válvula correspondiente.

En las **pruebas 9 y 10** se buscó forzar el límite del sistema, colocando pares de granos en paralelo (BB y MM) para simular un escenario de mayor complejidad. En estas

condiciones se evidenciaron errores recurrentes, con expulsiones incompletas o fallidas. Este comportamiento se explica porque el prototipo no está optimizado para procesar múltiples granos simultáneamente en el mismo cuadro, ya que la arquitectura de inferencia y el control neumático fueron diseñados para operar con un flujo lineal y secuencial.

Tabla 5

Resultados de validación del subsistema de eyección.

Prueba	Secuencia aplicada	Resultado	Observaciones
1	B – M – B – M – B – M	Correcta	Sin errores
2	B – B – B – M – M – M	Correcta	Sin errores
3	M – M – M – M – B – B	Error en 4.º grano	Un defectuoso no fue expulsado
4	B – B – B – B – M – M	Correcta	Sin errores
5	B – B – B – B – B – M	Error en 4.º y 5.º grano	Dos defectuosos no expulsados
6	M – M – M – M – M – B	Correcta	Sin errores
7	M – M – M – M – M – M	Correcta	Sin errores
8	B – B – B – B – B – B	Correcta	Sin errores
9	MM – BB – MM – BB	Parcial	Errores por granos en paralelo
10	BB – BB – MM – MM	Parcial	Errores por granos en paralelo

En términos generales, los resultados del subsistema de eyección confirmaron el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el diseño conceptual (sección 2.2.1.4).

Las válvulas neumáticas respondieron dentro del tiempo esperado, manteniendo la sincronización con la señal de inferencia y alcanzando una tasa de aciertos superior al 90 %

en condiciones nominales de operación. Si bien se registraron algunos errores aislados en secuencias lineales y un desempeño limitado frente a granos colocados en paralelo, estos escenarios extremos evidencian más bien las fronteras operativas del prototipo que fallos en el mecanismo de eyección en sí mismo. En conjunto, los ensayos validan que el subsistema de eyección es técnicamente viable, confiable y adecuado para la clasificación individual de granos de cacao, constituyendo un componente clave en la integración del sistema automatizado.

Figura 41 *Secuencia de prueba del prototipo: a la izquierda grano aceptado continúa en la trayectoria normal y a la derecha grano defectuoso es expulsado por la válvula.*

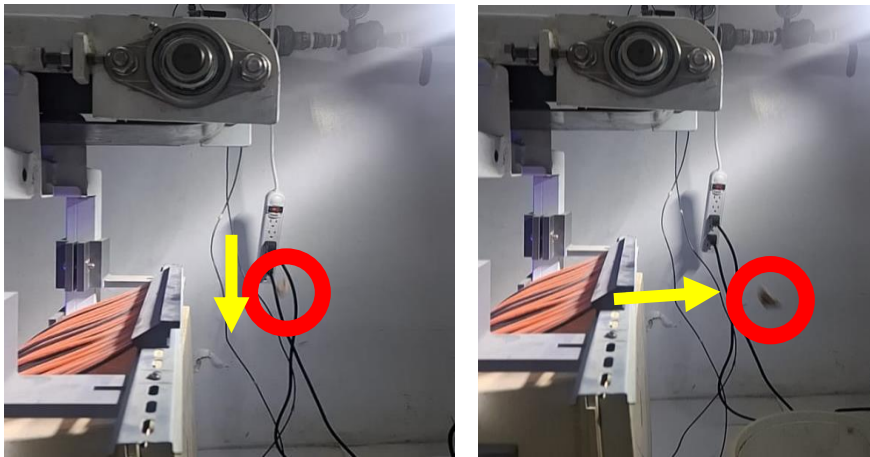
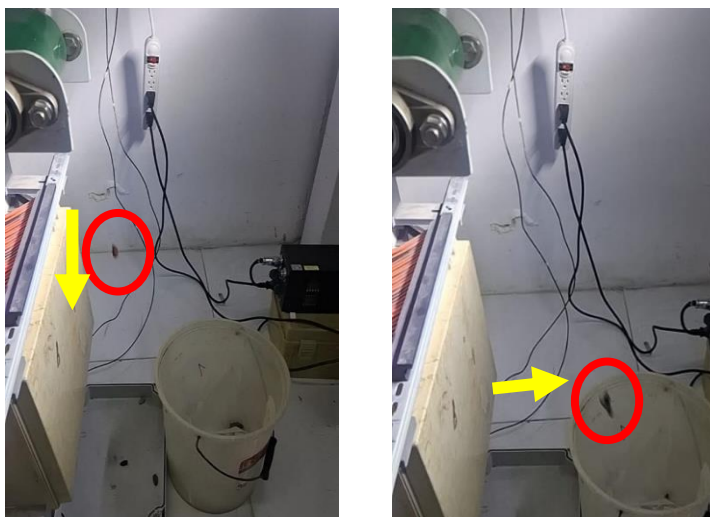


Figura 42 *Comparación visual del proceso de clasificación: flujo normal de grano (izquierda) versus eyección de grano defectuoso.*



En cuanto al desempeño temporal, durante estas pruebas integradas se midieron los tiempos de cada etapa del ciclo de clasificación. Los resultados mostraron valores de 0,2 ms para la adquisición de imagen, 6,4 ms para la inferencia del modelo YOLO-NAS-S y 0,1 ms para la activación de la válvula neumática, lo que representa un tiempo total aproximado de 6,7 ms por grano. Este valor se encuentra ampliamente por debajo del intervalo disponible entre la captura y la llegada del grano a la zona de eyección, lo que garantiza la sincronización efectiva entre detección y expulsión. La Figura 43 muestra la salida en consola donde se registran estos tiempos de manera experimental.

Figura 43

Medición de tiempos de captura, inferencia y activación

```
Inferencia: 6.4 ms – detecciones: 1
Tiempo de captura: 0.2 ms
Tiempo de activación: 0.1 ms
Inferencia: 6.4 ms – detecciones: 1
Tiempo de captura: 0.2 ms
Tiempo de activación: 0.1 ms
Inferencia: 6.6 ms – detecciones: 1
Tiempo de captura: 0.2 ms
Tiempo de activación: 0.1 ms
Inferencia: 10.2 ms – detecciones: 1
Tiempo de captura: 0.2 ms
Tiempo de activación: 0.2 ms
```

$$T_{\text{respuesta}} = T_{\text{captura}} + T_{\text{inferencia}} + T_{\text{eyección}} \quad (3.1)$$

$$T_{\text{respuesta}} = 0.2 + 6.4 + 0.2 = 6.8 \approx 7 \text{ [ms]} \quad (3.2)$$

3.2 Análisis de costos

Como parte de la evaluación integral del sistema, se elaboró un estimado de los costos asociados a la implementación del prototipo. Los valores se basan en precios referenciales de mercado local y en cotizaciones obtenidas durante el periodo de construcción. En la Tabla 3.4 se detallan los principales componentes del clasificador, junto con sus cantidades y características relevantes.

Tabla 6*Costos de materiales del prototipo*

N.º	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Costo total (USD)
1	Banda transportadora	1	—	1 111,00
2	Cámara de área Basler	1	—	950,00
3	Placas LED RGB (48 V)	2	35,00	70,00
4	Luz LED blanca regulable (incluye fuente 2 canales)	1	—	1 230,00
5	Válvulas neumáticas Matrix TH-446	7	65,00	455,00
6	Microcontrolador ESP32	1	15,00	15,00
7	Tarjeta de control para válvulas	1	90,00	90,00
8	Controlador de velocidad (potenciómetro)	1	20,00	20,00
9	Motor DC (accionamiento banda)	1	60,00	60,00
10	Fuente 5 V 10 A	1	20,45	20,45
11	Fuente 24 V 15 A	1	40,95	40,95
12	Fuente 48 V 7 A	1	58,50	58,50
13	Perfil de aluminio (70 USD/m)	2 m	70,00	140,00
14	Tablero eléctrico y canalización	2	40,00	80,00
Total, estimado de materiales				4 340,90

El costo de materiales del prototipo ascendió a 4 340,90 USD, considerando los componentes principales de transporte, visión, iluminación, control y eyección. Este valor refleja la naturaleza experimental del diseño, en el que se priorizó la confiabilidad de los equipos y la disponibilidad en el mercado local por encima de la optimización económica. La banda transportadora y el sistema de iluminación representan los rubros de mayor peso en el presupuesto, seguidos por la cámara industrial, cuyas prestaciones resultaron determinantes para garantizar la calidad en la etapa de captura de imágenes.

Cabe señalar que este costo corresponde únicamente a materiales y no incluye la mano de obra técnica involucrada en el diseño, ensamblaje y programación del sistema. Si se consideran aproximadamente 200 horas de trabajo especializado a una tarifa promedio de 20 USD/hora, el costo adicional ascendería a 4 000 USD, elevando el total global del prototipo a alrededor de 8 340,90 USD.

En términos de viabilidad, el valor obtenido es razonable para un prototipo de laboratorio orientado a investigación, donde los ensayos deben realizarse con componentes robustos y modulares que permitan ajustes y validaciones. Más allá de su costo, este tipo de desarrollos resulta altamente valioso debido a la proyección y escalabilidad que ofrece: un sistema de clasificación automática de granos no solo tiene aplicaciones directas en la industria cacaotera, sino que puede adaptarse a otros sectores agroindustriales o de manufactura que requieran inspección visual y separación de productos en tiempo real. Por lo tanto, la inversión realizada se justifica plenamente al considerarse no únicamente como un prototipo académico, sino como una base tecnológica con potencial de transferencia a múltiples escenarios productivos.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones

- Se implementó satisfactoriamente una estructura que integra los subsistemas de transporte, visión y eyección, comprobándose que el sistema de transporte mantiene un flujo continuo y ordenado de granos de cacao y confirmando que proporciona las condiciones necesarias para la clasificación automatizada.
- Se implementó un sistema de captura de imágenes conformado por cámara de área e iluminación controlada, permitiendo generar experimentalmente imágenes nítidas, con contraste estable y textura suficiente para realizar una inspección.
- Se entrenó y desplegó un modelo de detección basado en *YOLO*, optimizado para alcanzar tasas de inferencia cercanas a 110 FPS, permitiendo evaluar el modelo como robusto y confiable para operar en condiciones de laboratorio en tiempo real, cumpliendo con los requerimientos de clasificación.
- Se evidenció un funcionamiento coherente del subsistema de eyección implementado, demostrando un funcionamiento estable con las decisiones del modelo de visión artificial, garantizando la separación de los granos defectuosos dentro del flujo de clasificación.
- Se demostró que el prototipo funciona de manera integral, coordinando transporte, captura, inferencia y eyección, confirmando que los objetivos del proyecto se cumplieron y que el sistema constituye una base tecnológica escalable para aplicaciones industriales más amplias.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda investigar y diseñar mecanismos de guiado que aseguren la disposición individual de los granos, evitando configuraciones en paralelo que afectan la efectividad del sistema de eyección.
- Es aconsejable ampliar y diversificar el dataset de entrenamiento para fortalecer la capacidad del modelo YOLO en escenarios con mayor variabilidad, así como explorar técnicas de aprendizaje incremental para su adaptación en campo.
- Se recomienda analizar la integración de múltiples cámaras y canales de eyección, con el fin de incrementar el caudal de procesamiento y reducir errores en lotes de alto volumen.
- Se recomienda llevar el sistema a pruebas en condiciones industriales, considerando variaciones ambientales, con el propósito de consolidar su fiabilidad y generar indicadores comparativos frente a los métodos de clasificación manual y mecánica tradicional.

Referencias

- [1] P. González, «Primicias,» Primicias, 12 Febrero 2025. [En línea]. Available: <https://www.primicias.ec/economia/cacao-tercer-producto-exportaciones-ecuador-camaron-banano-89642/>. [Último acceso: 6 Junio 2025].
- [2] Fideval, «Fideval,» Fideval, 18 Agosto 2025. [En línea]. Available: <https://www.fideval.com/blog/4/ecuador-y-cacao-bonanza-coyuntural-o-una-oportunidad-para-liderar-la-industria/#:~:text=Ecuador%20ya%20aporta%20m%C3%A1s%20del,el%20cuarto%20en%20el%20planeta..> [Último acceso: 22 Agosto 2025].
- [3] Banco Interamericano de Desarrollo, «BID Publications,» Banco Interamericano de Desarrollo, 2022. [En línea]. Available: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Strategies-to-Strengthen-Ecuadors-High-Value-Cacao-Value-Chain.pdf?> [Último acceso: 7 Junio 2025].
- [4] A. S. A. Z. U. & Q. A. S. Khan, «A survey of the recent architectures of deep convolutional neural networks,» *Artificial Intelligence Review*, p. 5455–5516, 2020.
- [5] J. Gu, Z. Wang, J. Kuen, L. Ma, A. Shahroudy, B. Shuai, T. Liu, X. Wang, G. Wang, J. Cai y T. Chen, «Recent advances in convolutional neural networks,» *Pattern Recognition*, p. 354–377, 2018.
- [6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick y A. Farhadi, «You Only Look Once: Unified, real-time object detection,» *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, p. 779–788, 2016.
- [7] B. Paredes, «COGNEX,» 1 Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.cognex.com/blogs/machine-vision/line-scan-versus-area-scan-technology>.
- [8] D. Wilcher, «MAKER.IO,» 29 Mayo 2024. [En línea]. Available:

<https://www.digikey.com/en/maker/blogs/2024/a-guide-for-the-esp32-microcontroller-series>.

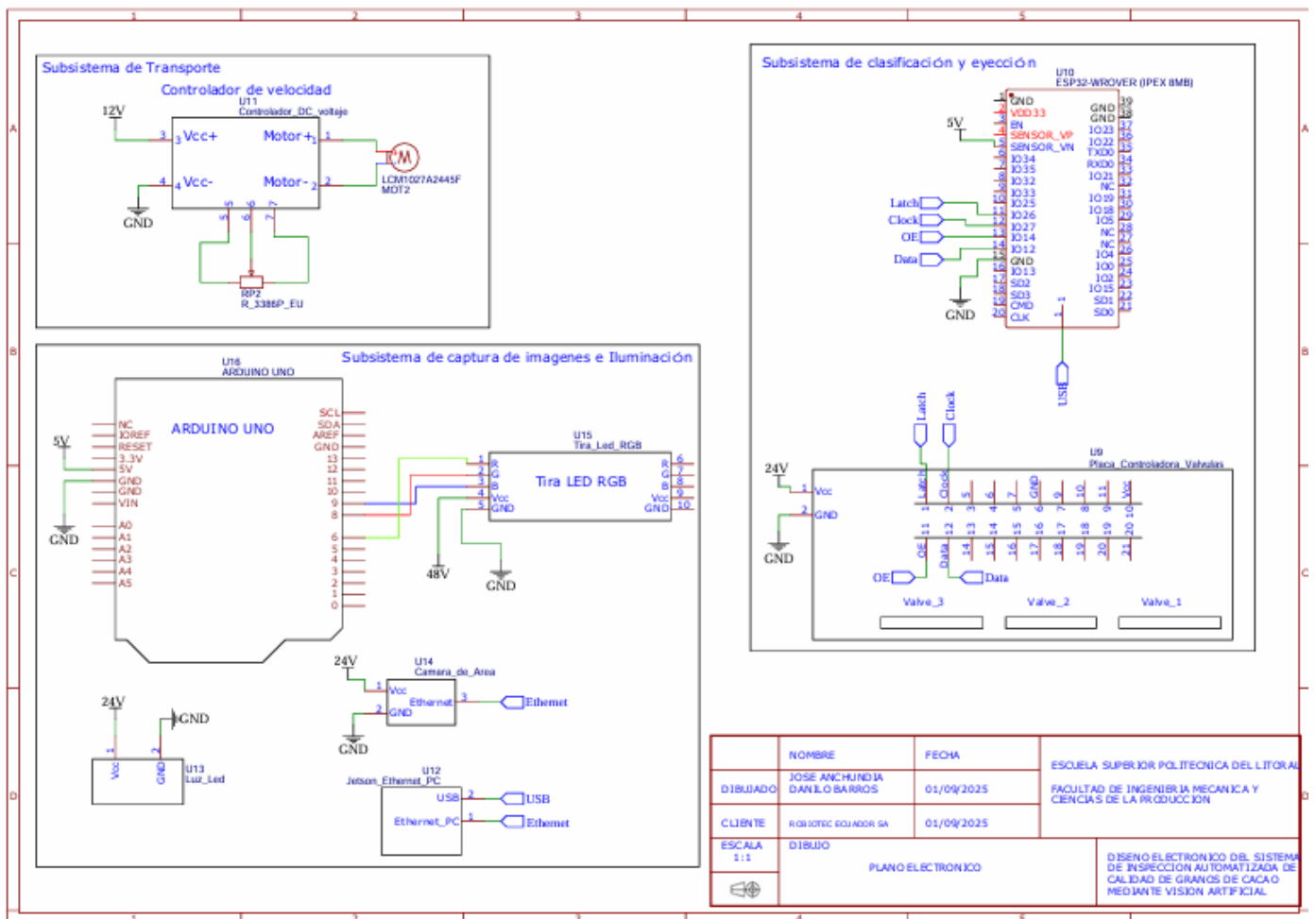
- [9] GeeksforGeeks, «GeeksforGeeks,» GeeksforGeeks, 4 Febrero 2024. [En línea].
Available: <https://www.geeksforgeeks.org/potentiometer-as-a-voltage-divider/>.
- [10 M. White, «Hoses Direct,» 19 Marzo 2025. [En línea]. Available: [https://hoses.co.uk/the-
\] role-of-pneumatic-valves-in-automated-systems/](https://hoses.co.uk/the-role-of-pneumatic-valves-in-automated-systems/).
- [11 H. & K. J. Budinoff, «CAD as a Virtual Prototyping Method: Uses and Timing of
] Computer-Aided Design Artifacts in Hardware Design,» *International Journal of Engineering Education*, p. 1175–1190, 2024.
- [12 Fontagro, «Manejo poscosecha del cacao,» Fundación para la Innovación Agraria, 2021.
]
- [13 INIAP, «Boletín técnico: Producción y manejo del cacao nacional fino de aroma,»
] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador, 2019.
- [14 M. E. J. & S. D. Guamán, «Evaluación de la calidad del cacao nacional fino de aroma
] durante las etapas de fermentación y secado,» *Revista de Agroindustria y Medio Ambiente*, pp. 45-53, 2020.
- [15 FAO, «Post-cosecha del cacao: Manual de buenas prácticas,» Organización de las
] Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022.
- [16 R. Klemetson, «ASSEMBLY,» 24 Febrero 2025. [En línea]. Available:
] [https://www.assemblymag.com/articles/99083-comparing-electric-and-pneumatic-
actuators?](https://www.assemblymag.com/articles/99083-comparing-electric-and-pneumatic-actuators?).
- [17 M. David, «POWER&MOTION,» 15 Enero 2009. [En línea]. Available:
] [https://www.powermotiontech.com/pneumatics/pneumatic-
valves/article/21884192/machine-goes-nuts-with-pneumatics](https://www.powermotiontech.com/pneumatics/pneumatic-valves/article/21884192/machine-goes-nuts-with-pneumatics).

- [18 Basler, «Basler,» Basler, 2024. [En línea]. Available:
] <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca1920-150um-gige-color/>. [Último acceso: 29 Junio 2025].
- [19 Matrix, «TH-446 Matrix Ejector for Color Sorting Machine – Datasheet,» 2024. [En
] línea].
- [20 Espressif Systems, «Espressif Systems,» 2024. [En línea]. Available:
] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.

Apéndice

Apéndice A

Plano Electrónico



Apéndice B

Configuración de la cámara

Tabla 7

Parámetros de configuración de la cámara de área utilizados en el sistema de clasificación

Parámetro	Valor	Descripción breve
Width	1316 px	Ancho de la imagen capturada
Height	260 px	Alto de la imagen capturada
Offset X	236 px	Desplazamiento horizontal del área de captura
Offset Y	600 px	Desplazamiento vertical del área de captura
Pixel Format	BGR8	Formato de píxel en 8 bits por canal (color)
Balance Red	1.5	Balance de color canal rojo
Balance Blue	1.5	Balance de color canal azul
Balance Green	0.8	Balance de color canal verde
Exposure Time	300 μ s	Tiempo de exposición de cada captura
FPS	300	Velocidad de adquisición de imágenes (frames por segundo)
Gamma	0.9	Corrección gamma aplicada a la imagen
Gain	18	Ganancia aplicada al sensor

Los parámetros de configuración de la cámara Basler se definieron mediante un proceso de pruebas experimentales, con el objetivo de resaltar las características visuales más relevantes de cada grano de cacao. La selección del área de captura permitió centrar la visión en la banda transportadora, evitando información irrelevante del entorno. El balance de blancos manual se ajustó para compensar la iluminación RGB y blanca del sistema, logrando una representación más consistente de los colores. La exposición, la ganancia y la corrección gamma se fijaron para maximizar el contraste superficial sin generar saturación. Finalmente, la alta tasa de captura (300 fps) garantizó que el sistema de visión pudiera operar de forma continua y estable en tiempo real.

Apéndice C

Script de inferencia

```
import os
import sys
import cv2
import torch
import numpy as np

sys.path.insert(0, "/home/robiotec/Documents/cacao-sorter/nanodet")
from nanodet.data.transform import Pipeline
from nanodet.model.arch import build_model
from nanodet.util import Logger, cfg, load_config, load_model_weight

class ModelInference:
    def __init__(self, config_path, model_path, device=None, use_half=True,
compile_model=True):
        self.device = device or torch.device("cuda" if
torch.cuda.is_available() else "cpu")
        print(f"Usando dispositivo: {self.device}")

        load_config(cfg, config_path)
        self.logger = Logger(-1, use_tensorboard=False)

        self.model = build_model(cfg["model"])
        ckpt = torch.load(model_path, map_location="cpu")
        load_model_weight(self.model, ckpt, self.logger)
        self.model = self.model.to(self.device).eval()

        self.use_half = use_half and self.device.type == "cuda"
        if self.use_half:
            self.model = self.model.half()
            print("Inferencia en FP16 habilitada.")

        if compile_model and hasattr(torch, "compile"):
            self.model = torch.compile(self.model)
            print("Modelo compilado con torch.compile().")

        self.pipeline = Pipeline(cfg["data"]["val"]["pipeline"],
cfg["data"]["val"]["keep_ratio"])
        self.input_size = cfg["data"]["val"]["input_size"]

        torch.backends.cudnn.benchmark = True

        dummy_img = np.zeros((self.input_size[1], self.input_size[0], 3),
dtype=np.uint8)
        meta = {
            "img_info": {
                "id": [0],
                "file_name": ["dummy"],
                "height": [dummy_img.shape[0]],
                "width": [dummy_img.shape[1]],
            },
            "warp_matrix": [np.eye(3, dtype=np.float32)]
        }
        img_tensor = torch.from_numpy(dummy_img).permute(2, 0,
1).unsqueeze(0)
        img_tensor = img_tensor.to(self.device, non_blocking=True)
```

```

        img_tensor = img_tensor.half() if self.use_half else
img_tensor.float()

        with torch.no_grad():
            self.model.inference({"img": img_tensor, **meta})
            print("Modelo precalentado.")

def preprocess(self, img, file_name="array_input"):
    img_info = {"id": [0], "file_name": [file_name],
                "height": [img.shape[0]], "width": [img.shape[1]]}
    meta = {"img_info": img_info, "raw_img": img, "img": img}
    meta = self.pipeline(None, meta, self.input_size)

    if "warp_matrix" in meta and not isinstance(meta["warp_matrix"],
list):
        meta["warp_matrix"] = [meta["warp_matrix"]]

    tensor = torch.from_numpy(meta["img"]).permute(2, 0,
1).contiguous()
    tensor = tensor.to(self.device, non_blocking=True)
    tensor = tensor.half() if self.use_half else tensor.float()
    return tensor.unsqueeze(0), meta

def predict(self, img, score_thres=0.6, file_name="array_input"):
    if img is None:
        return None, {}

    tensor, meta = self.preprocess(img, file_name)

    meta.pop("img", None)

    with torch.no_grad():
        results = self.model.inference({"img": tensor, **meta})

    filtered = {
        cid: [box for box in det if box[-1] > score_thres]
        for cid, det in results[0].items()
    }
    return img, filtered

def predict_from_path(self, img_path, score_thres=0.6):
    img = cv2.imread(img_path)
    if img is None:
        print(f"No se pudo leer {img_path}")
        return None, {}
    return self.predict(img, score_thres=score_thres,
file_name=os.path.basename(img_path))

```

Script de control del sistema de eyección

```
from dataclasses import dataclass

@dataclass
class EjectorValve:
    image_width: int # Ancho de la imagen
    image_height: int # Alto de la imagen
    num_outputs: int = 63 # Número total de salidas físicas (63 en este caso)
    cols: int = 63 # Número de columnas en la cuadrícula (ajustado para 63 salidas)
    rows: int = 1 # Número de filas en la cuadrícula (solo 1 fila en el eje Y)
    cell_width: int = None # Ancho de cada celda
    cell_height: int = None # Alto de cada celda
    outputs: list = None # Lista de objetos PhysicalOutput

    def __post_init__(self):
        self.cell_width = self.image_width // self.cols
        self.cell_height = self.image_height // self.rows

        self.outputs = []
        output_id = 0
        for _ in range(self.rows):
            for col in range(self.cols):
                x_range = (col * self.cell_width, (col + 1) * self.cell_width)
                self.outputs.append({"output_id": output_id, "x_range": x_range})
                output_id += 1

    def assign_output_to_cell(self, bbox):
        x1, _, x2, _ = bbox[:4]

        activated_outputs = set()

        col_start = int(x1 // self.cell_width)
        col_end = int(x2 // self.cell_width)

        for col in range(col_start, col_end + 1):
            activated_outputs.add(self.outputs[col]["output_id"])

        return list(activated_outputs)

    def process_detections(self, detections):
        activated_outputs = []
        for det in detections:
            activated_outputs.extend(self.assign_output_to_cell(det))
        return activated_outputs

    def convert_to_shift_registers(self, activated_outputs=None):
        shift_registers = [0xFF] * 16

        # # Si tienes algunos outputs específicos para activar, actívalos
        # if activated_outputs:
        #     for output in activated_outputs:
        #         register_index = output // 4
```

```
#         bit_position = (output % 4) * 2

#         shift_registers[register_index] |= (1 << (bit_position +
1))
#         shift_registers[register_index] |= (1 << bit_position)

return shift_registers
```

Script de etiquetado de datos

```
import os
import random
import cv2
import json
import shutil
from model_inference import ModelInference

def get_split():
    r = random.random()
    if r < 0.7:
        return "train"
    elif r < 0.85:
        return "val"
    else:
        return "test"

def get_boxes_from_model(img_path, model, pipeline, device, label,
score_thres=0.2):
    img, detections = model.predict_from_path(img_path,
score_thres=score_thres)
    boxes = []
    if img is not None and detections[1]:
        for det in detections[1]:
            if isinstance(det, (list, tuple)) and len(det) == 5:
                x1, y1, x2, y2, score = det
                xc = ((x1 + x2) / 2) / img.shape[1]
                yc = ((y1 + y2) / 2) / img.shape[0]
                w = (x2 - x1) / img.shape[1]
                h = (y2 - y1) / img.shape[0]
                boxes.append((label, xc, yc, w, h))
    return img, boxes

def yolo_to_coco(box, img_w, img_h):
    label, xc, yc, w, h = box
    bw = w * img_w
    bh = h * img_h
    x_min = (xc * img_w) - (bw / 2)
    y_min = (yc * img_h) - (bh / 2)
    return [x_min, y_min, bw, bh], bw * bh, label

def process_folder(src_folder, label, out_base, model, coco_data,
ann_id_start):
    prefix = "bad_" if label == 0 else "good_"
    ann_id = ann_id_start
    for fname in os.listdir(src_folder):
        if not fname.lower().endswith((".jpg", ".jpeg", ".png")):
            continue
        img_path = os.path.join(src_folder, fname)
        img, boxes = get_boxes_from_model(img_path, model, None, None,
label)
        if img is None:
            print(f"Could not read {img_path}")
            continue

    split = get_split()
    out_img_dir = os.path.join(out_base, split, "images")
    out_label_dir = os.path.join(out_base, split, "labels")
    os.makedirs(out_img_dir, exist_ok=True)
    os.makedirs(out_label_dir, exist_ok=True)
```

```

base_name = os.path.splitext(fname)[0]
ext = os.path.splitext(fname)[1]
last_digits = base_name[-5:] if len(base_name) >= 5 else base_name
new_img_name = f"{prefix}{last_digits}{ext}"
new_label_name = f"{prefix}{last_digits}.txt"

# Guardar imagen
out_img_path = os.path.join(out_img_dir, new_img_name)
cv2.imwrite(out_img_path, img)

# Guardar label YOLO
out_label_path = os.path.join(out_label_dir, new_label_name)
with open(out_label_path, "w") as f:
    for box in boxes:
        f.write(f"{box[0]} {box[1]:.6f} {box[2]:.6f} {box[3]:.6f}
{box[4]:.6f}\n")

# COCO estructura
img_id = len(coco_data[split]["images"]) + 1
coco_data[split]["images"].append({
    "id": img_id,
    "file_name": new_img_name,
    "width": img.shape[1],
    "height": img.shape[0]
})
for box in boxes:
    bbox, area, cat_id = yolo_to_coco(box, img.shape[1],
img.shape[0])
    coco_data[split]["annotations"].append({
        "id": ann_id,
        "image_id": img_id,
        "category_id": cat_id,
        "bbox": bbox,
        "area": area,
        "iscrowd": 0
    })
    ann_id += 1
return ann_id

def clean_dataset_folders(out_base):
    for split in ["train", "val", "test"]:
        split_dir = os.path.join(out_base, split)
        if os.path.exists(split_dir):
            shutil.rmtree(split_dir)
    ann_dir = os.path.join(out_base, "annotations")
    if os.path.exists(ann_dir):
        shutil.rmtree(ann_dir)

def save_coco_annotations(out_base, coco_data):
    ann_dir = os.path.join(out_base, "annotations")
    os.makedirs(ann_dir, exist_ok=True)
    for split in ["train", "val", "test"]:
        data = {
            "info": {"description": "Cacao dataset", "version": "1.0",
"year": 2025},
            "images": coco_data[split]["images"],
            "annotations": coco_data[split]["annotations"],
            "categories": [
                {"id": 0, "name": "bad"},
                {"id": 1, "name": "good"}

```

```

    ]
}
with open(os.path.join(ann_dir, f"{split}.json"), "w") as f:
    json.dump(data, f, indent=2)

def main():
    base_dir = os.path.dirname(os.path.dirname(os.path.abspath(__file__)))
    bad_dir = os.path.join(base_dir, "images-bad")
    good_dir = os.path.join(base_dir, "images-good")
    out_base = os.path.join(base_dir, "dataset")
    config_path = os.path.join(base_dir, "dataset/config.yaml")
    model_path = os.path.join(base_dir,
                              "model_best/nanodet_model_best.pth")

    model = ModelInference(config_path, model_path)

    clean_dataset_folders(out_base)

    coco_data = {
        "train": {"images": [], "annotations": []},
        "val": {"images": [], "annotations": []},
        "test": {"images": [], "annotations": []}
    }
    ann_id = 1
    ann_id = process_folder(bad_dir, 0, out_base, model, coco_data, ann_id)
    ann_id = process_folder(good_dir, 1, out_base, model, coco_data,
                             ann_id)

    save_coco_annotations(out_base, coco_data)

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Repositorio del proyecto

El resto de los *scripts*, configuraciones y utilidades adicionales se encuentran disponibles en el repositorio del proyecto, en el siguiente enlace:

<https://github.com/jose012000/cacao-sorter.git>

Apéndice D

Consumo eléctrico del sistema

Tabla 8

Consumo eléctrico estimado de los componentes del sistema de clasificación de cacao.

Item	Grupo	Descripción	Voltaje [DC]	Corriente Teo. [A]	Potencia Teo. [W]	Cantidad	Potencia Total [W]
1	Cámara	Cámara Basler	24	0,75	18	1	18
2	Fondo	Fondo Iluminación	48	3,35	160,8	1	160,8
3	Iluminación	Luz LED Blanca	24	12,5	300	1	300
4	Transporte	Motor DC Banda	12	7,5	90	1	90
5	Electrónica	ESP32	5	0,4	2	1	2
6	Electrónica	Placa Taigo	24	2	48	1	48
7	Neumático	Válvulas	24	1	24	6	144

El consumo eléctrico del sistema de clasificación de cacao fue calculado en base a los principales subsistemas empleados: cámara de visión artificial, iluminación (fondo y luz blanca), transporte, electrónica de control y válvulas neumáticas. Cada componente se analizó considerando su voltaje de operación, corriente teórica y potencia, lo que permitió estimar la potencia total demandada por el prototipo en aproximadamente 763 W. Esta información es clave para dimensionar correctamente las fuentes de alimentación y garantizar una operación estable del sistema.

Apéndice E

Ficha técnica de las válvulas

Figura 44

Ficha técnica de la válvula (parte 1).

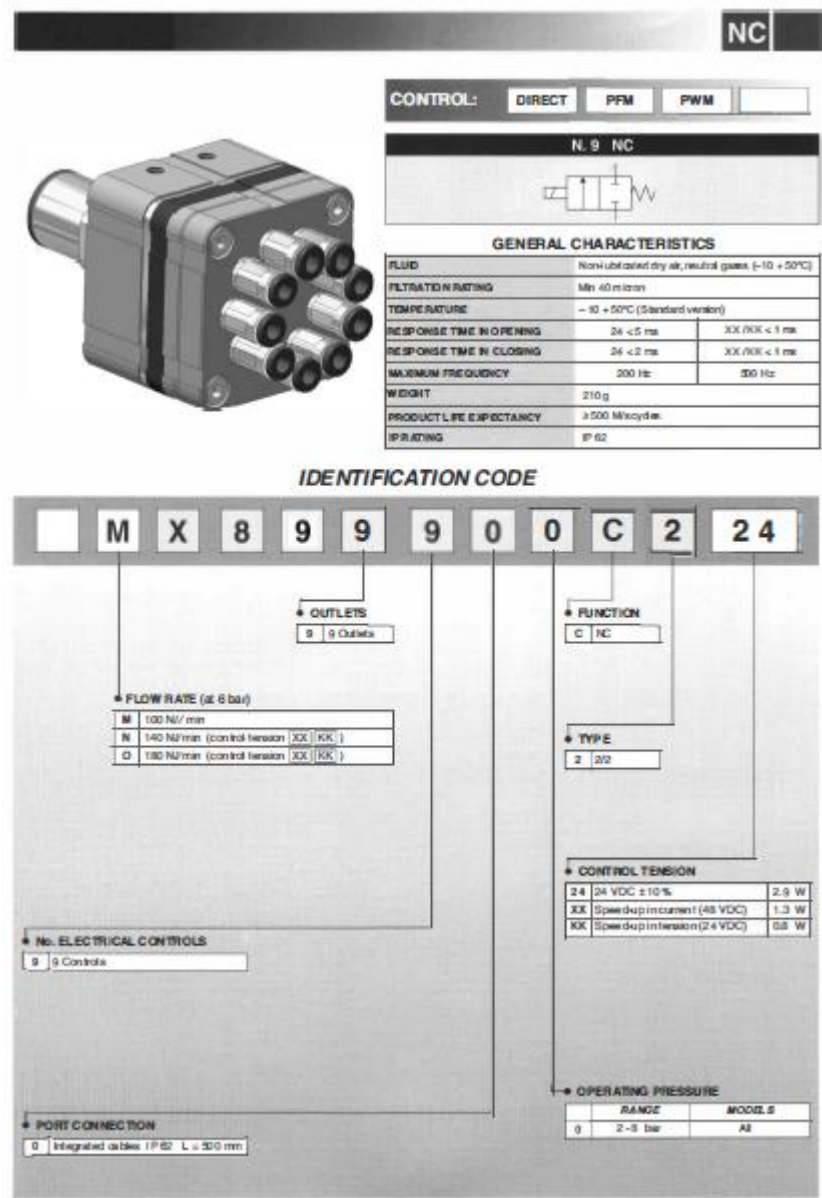
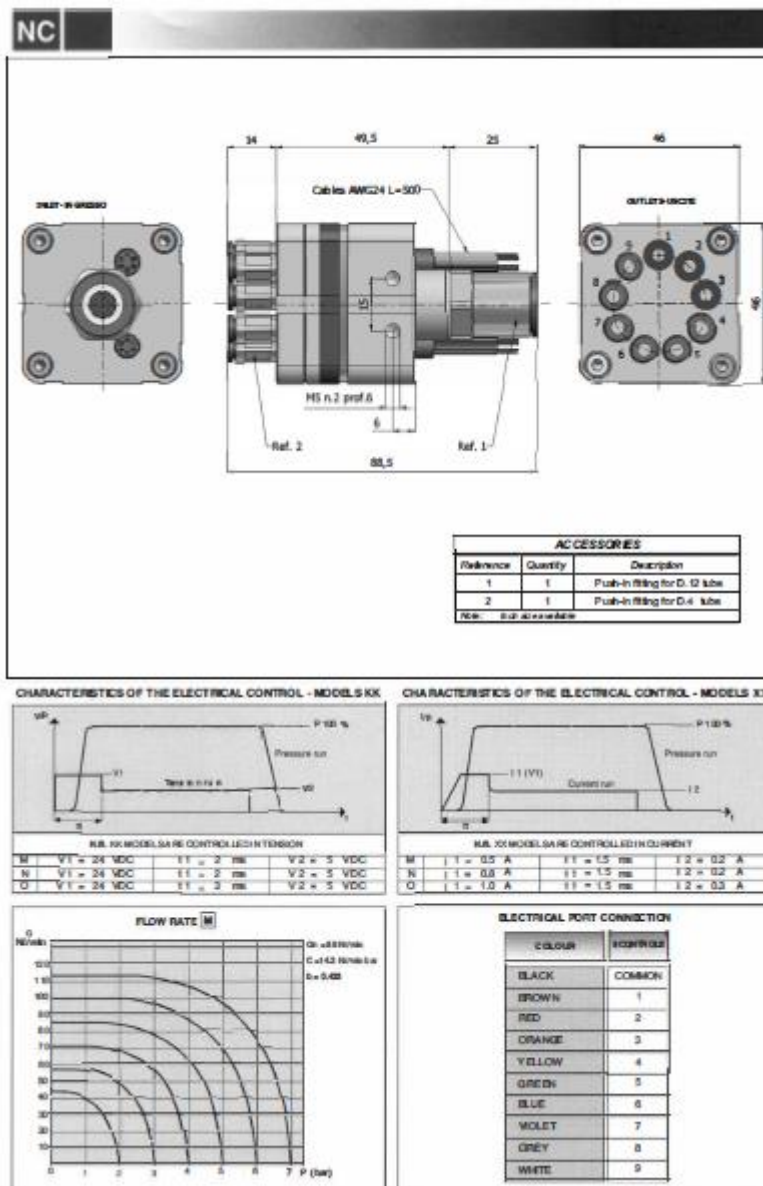


Figura 45

Ficha técnica de la válvula (parte 2).



Apéndice F

Resultados de la evaluación de modelos en la Jetson.

Tabla 9

Rendimiento de los modelos en Jetson

Modelo	Variante	Tamaño de entrada	PyTorch (.pt)	TensorRT (FP16)	Observaciones
<i>NanoDet</i>	Base	320 px	~100 ms (~10 FPS)	~40 ms (~25 FPS)	Modelo ligero; desempeño aceptable, pero sin aprovechar el máximo de la Jetson
<i>YOLO-NAS</i>	S	640 px	~80 ms (~12 FPS)	~9 ms (~110 FPS, estable)	Alto rendimiento; adecuado para escenarios de tiempo real exigente

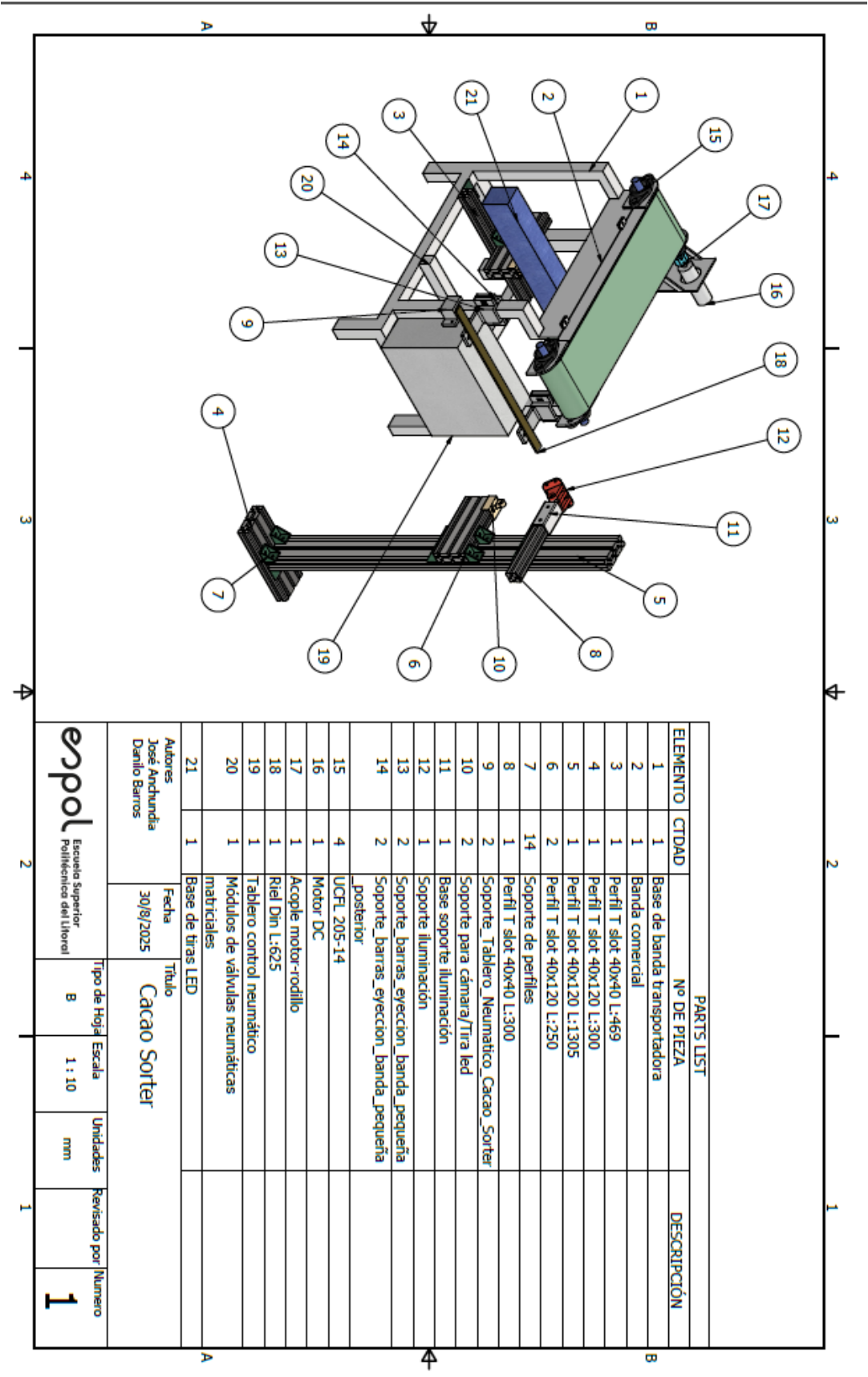
Tabla 10

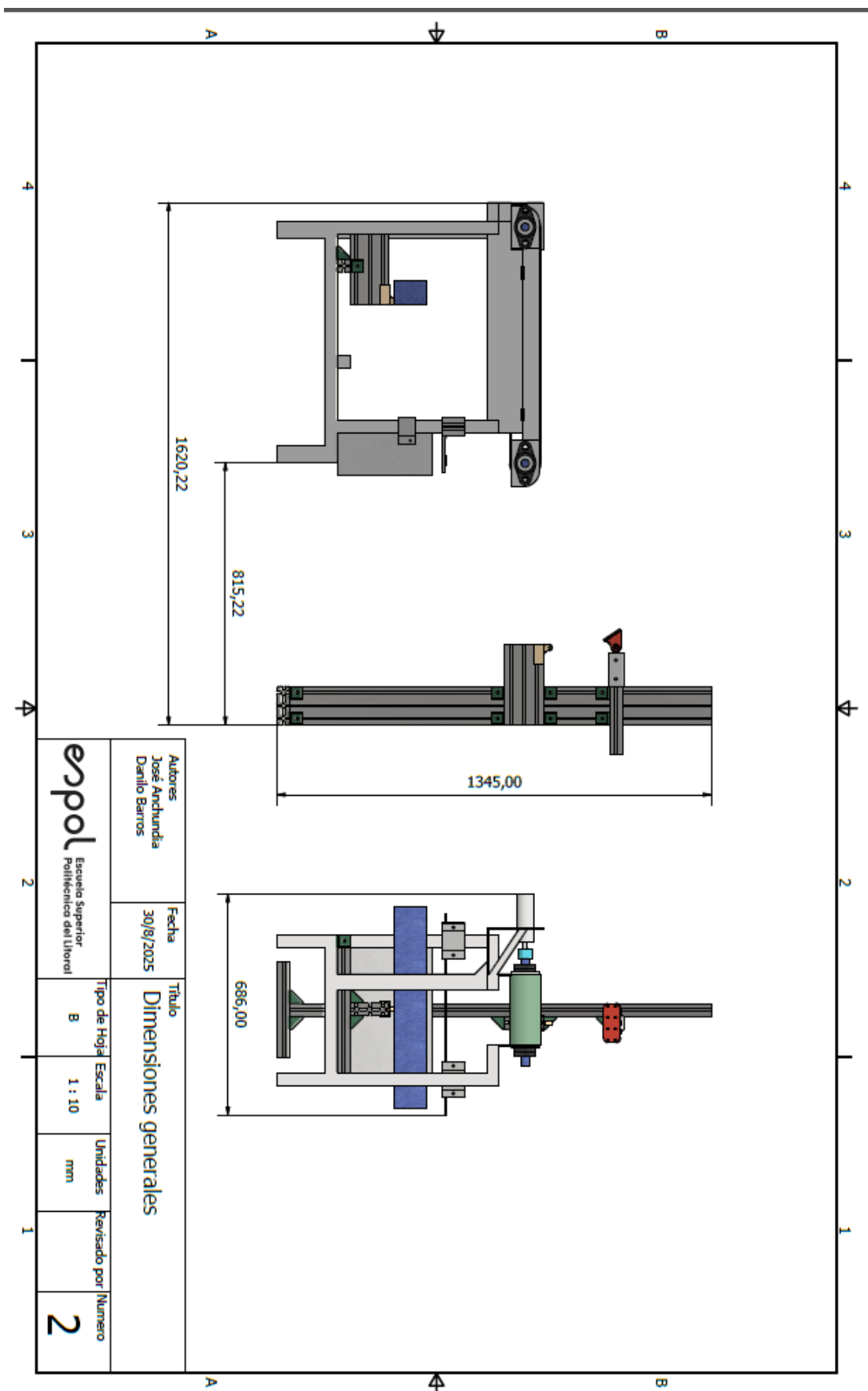
Parámetros prácticos de implementación y entrenamiento

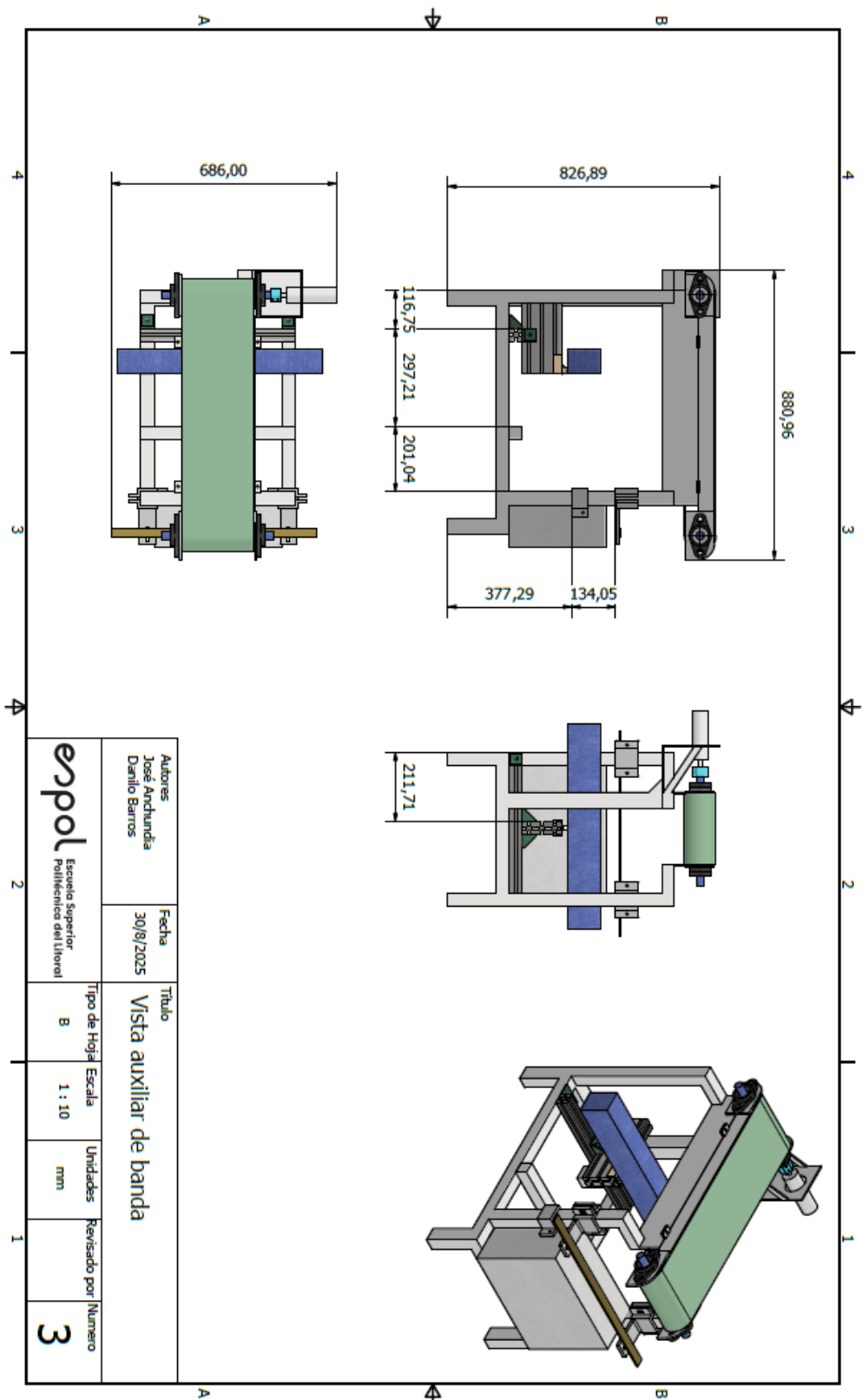
Dimensión	<i>NanoDet (320 px)</i>	<i>YOLO-NAS-S (640 px)</i>
Dataset	~5 000 imágenes; 2 clases + fondo	Mismo <i>dataset</i>
Estrategia de anotación	Prefase automática con <i>Grounding DINO</i> + validación manual	Igual; integración directa con formato <i>YOLO TXT</i>
Facilidad de preparar datos	Alta con YOLO; conversión a COCO más compleja	Alta con YOLO; conversión a COCO evitada
Nº de parámetros aprox.	1–3 M	~19 M
Costo computacional	Bajo	Medio
Tiempo de entrenamiento	Corto; converge rápido a 320 px	Medio; requiere más épocas a 640 px
Exportación a ONNX/TRT	Estable	Estable, con mejoras significativas en FP16
Cuantización INT8	Descartada por pérdida de detección	Descartada por pérdida de detección
Posprocesamiento (NMS)	Simple; <i>overhead</i> bajo	Marginal, sin impacto relevante
Uso de memoria en inferencia	Muy bajo	Medio
Ecosistema y soporte	Repositorios activos, buena documentación	Ecosistema reciente y optimizado para Jetson
Casos de uso esperados	Sistemas embebidos con fuerte restricción de recursos	Aplicaciones de tiempo real exigente, hasta 150 FPS en <i>Jetson Orin</i>

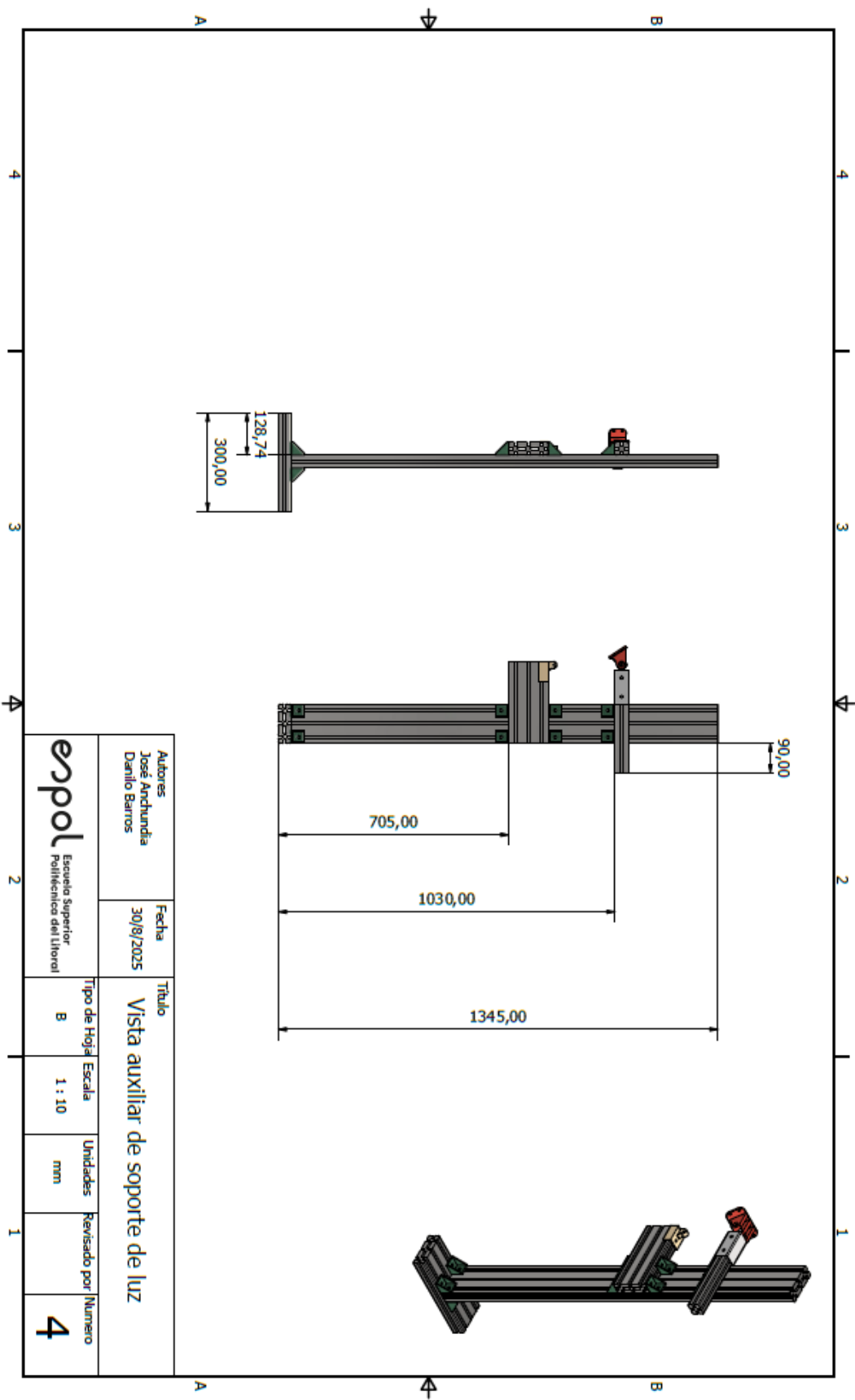
Apéndice G

Planos de sistemas mecánicos en el prototipo



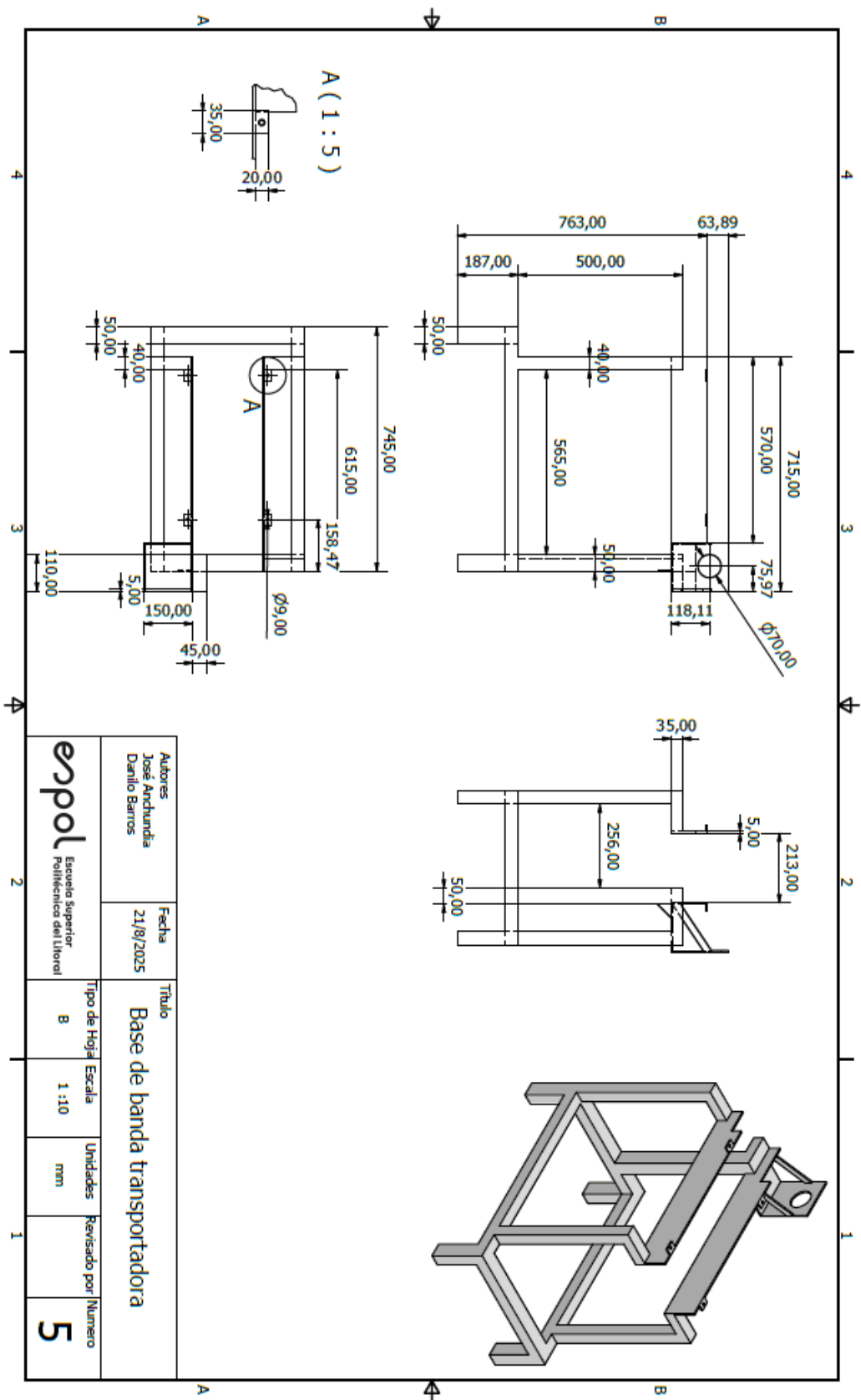


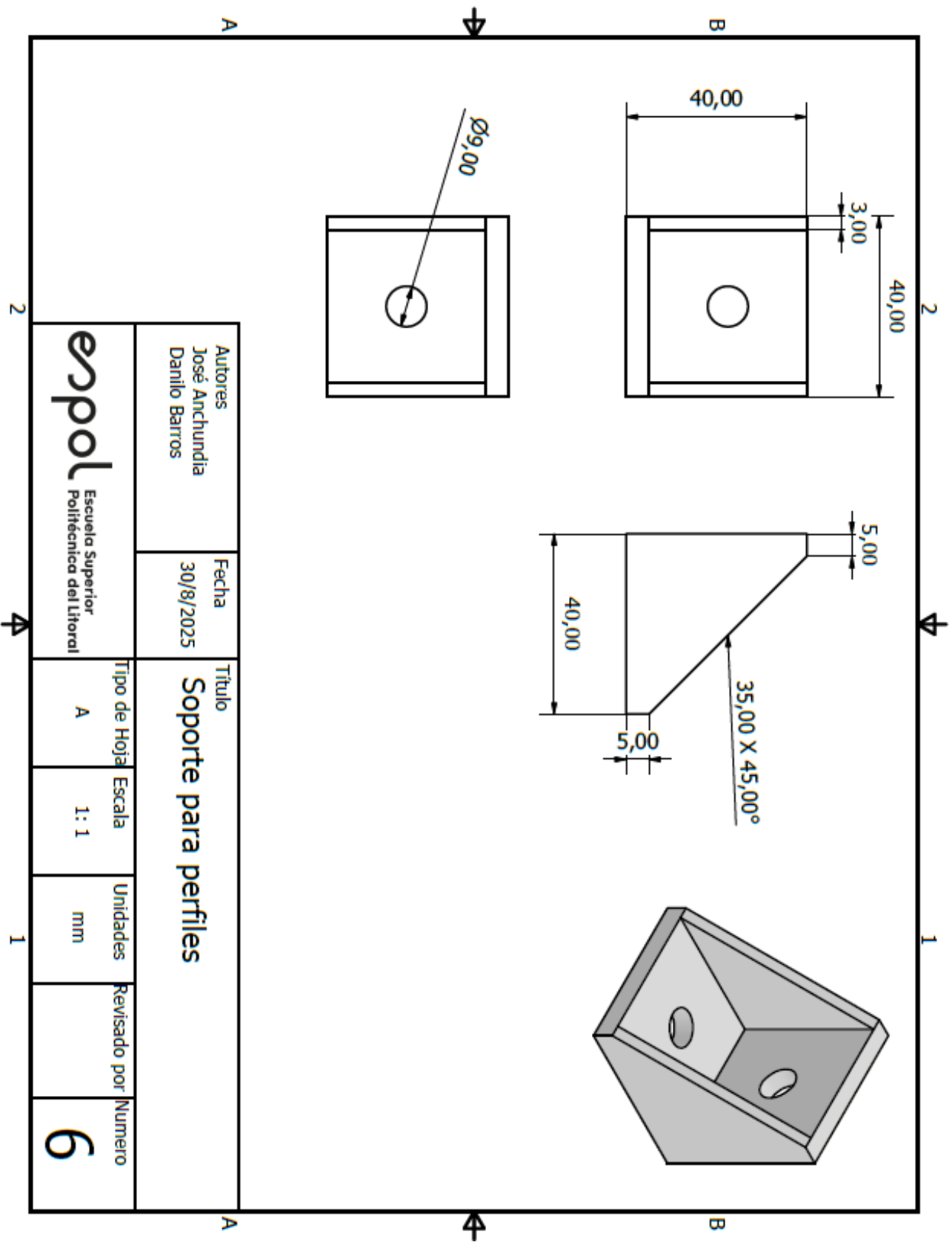


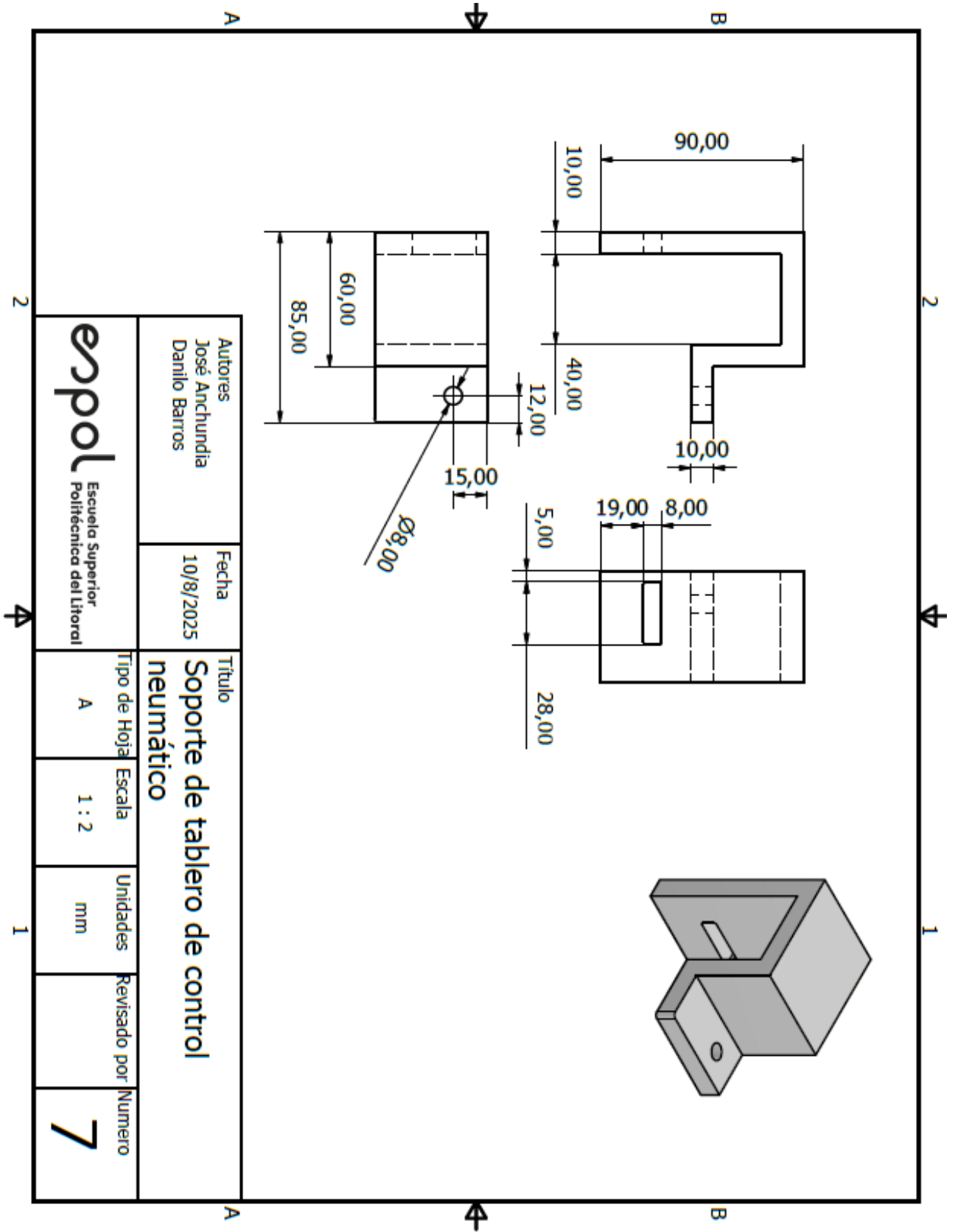


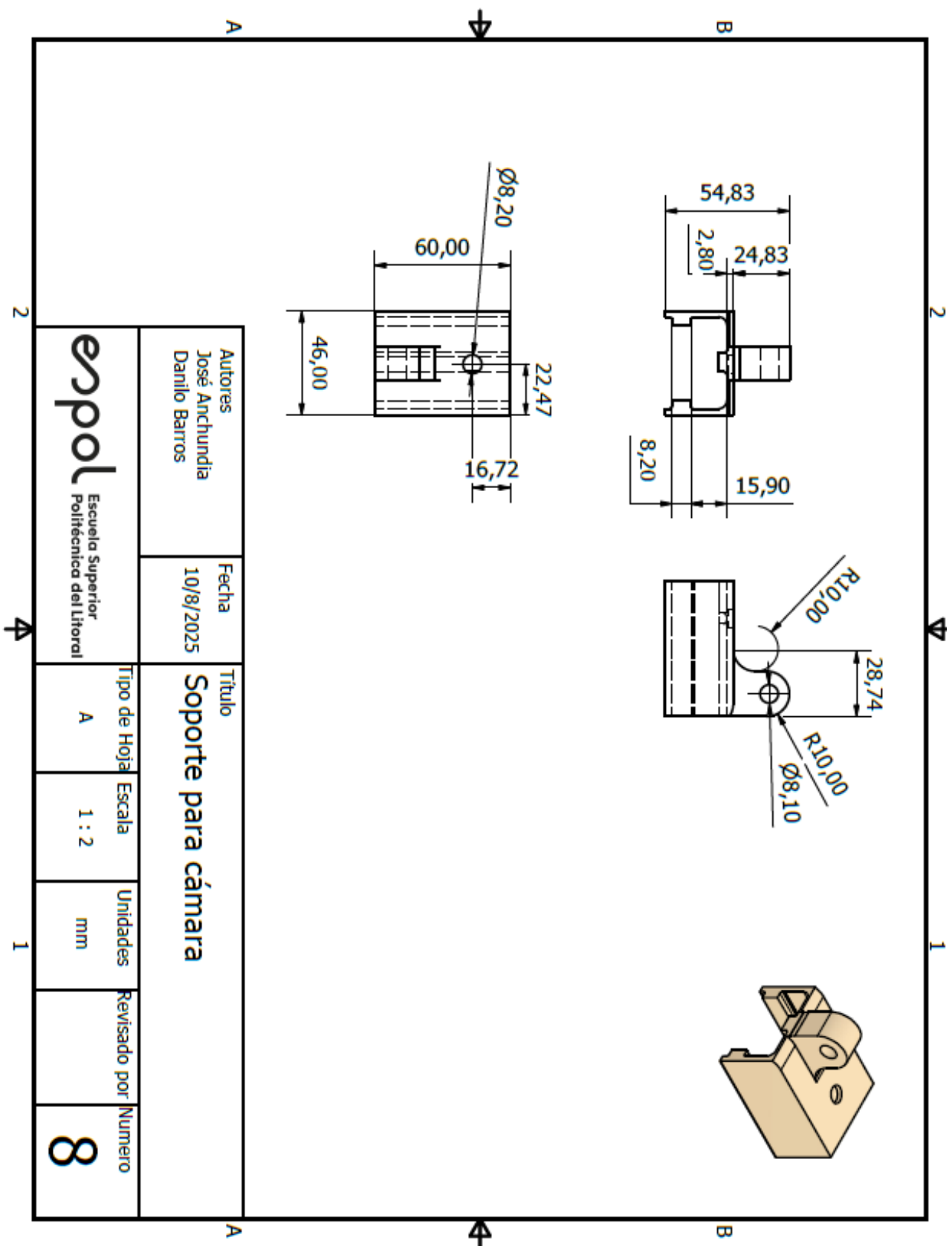
Autores José Archundia Danilo Barros		Fecha 30/8/2025		Título Vista auxiliar de soporte de luz	
Tipo de Hoja B		Escala 1 : 10		Unidades mm	
Revisado por 4		Número		4	

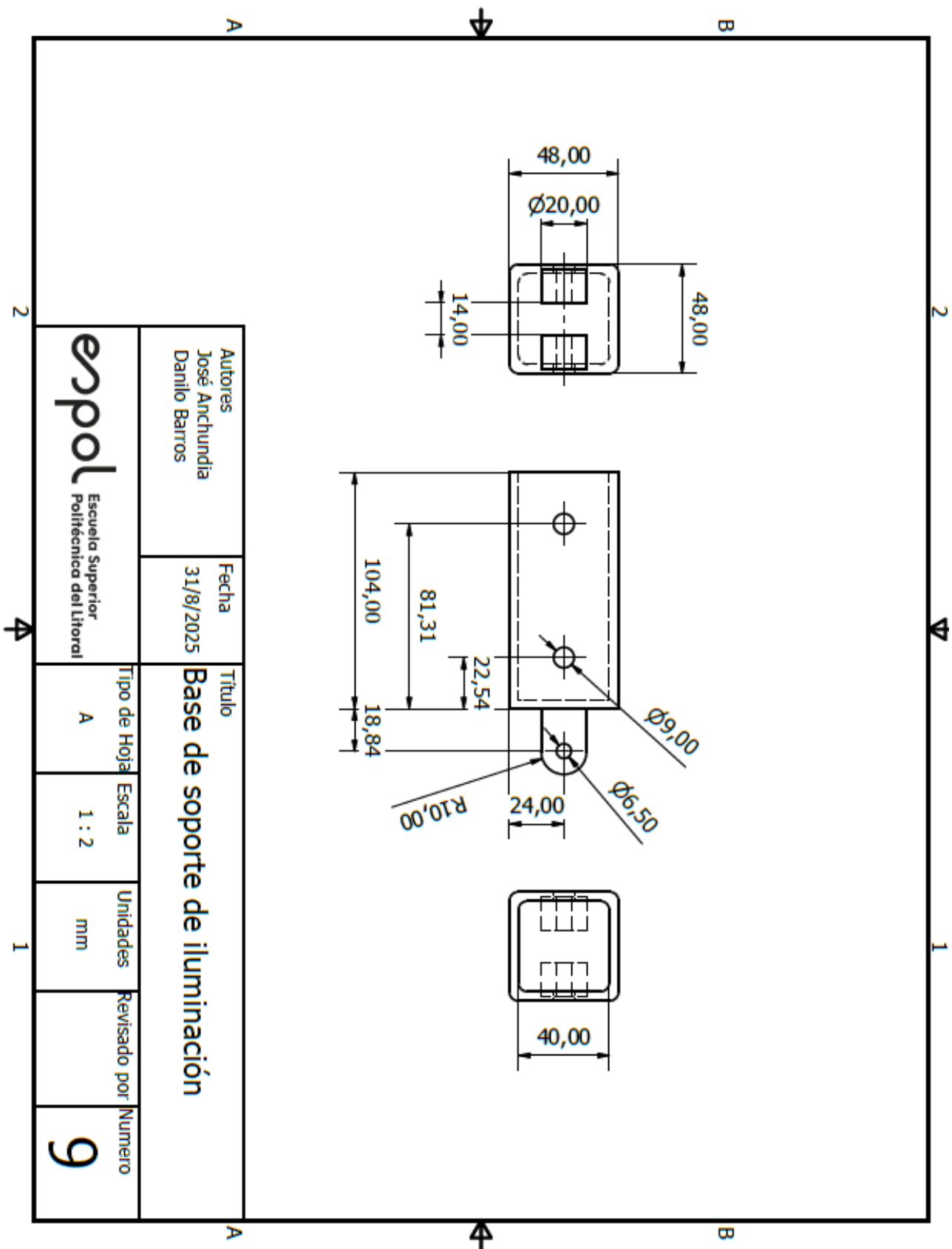
Escuela Superior
 Politécnica del Litoral

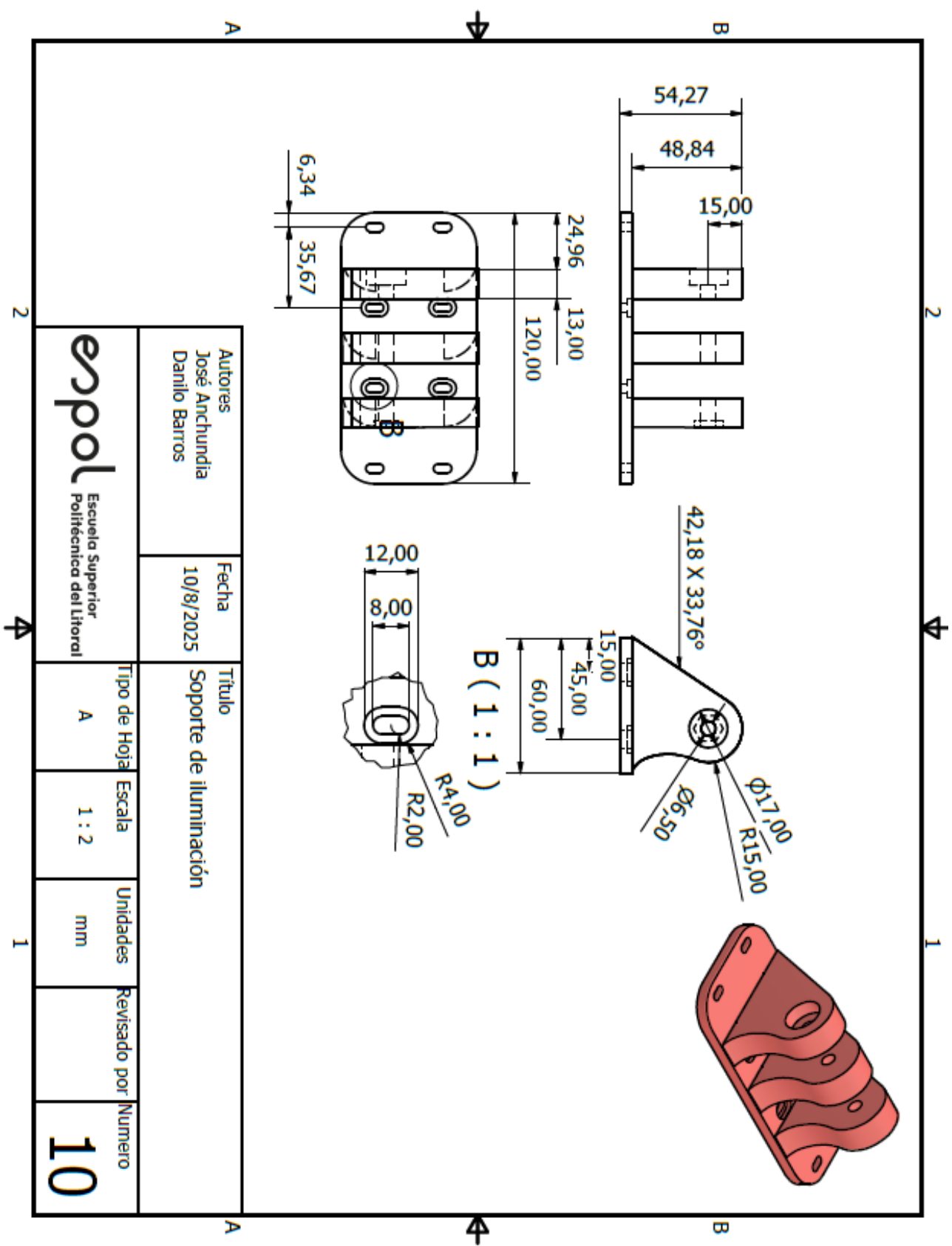


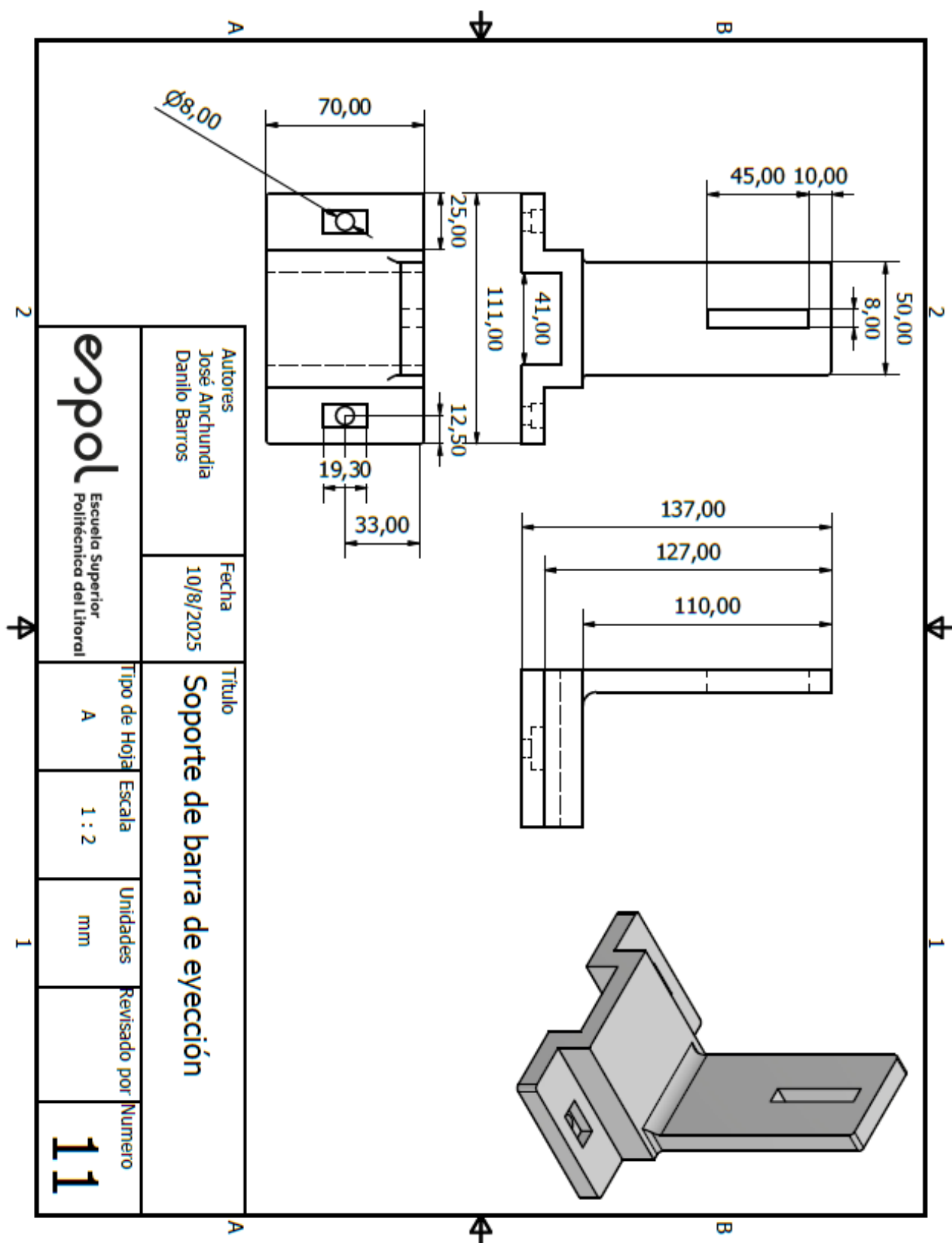




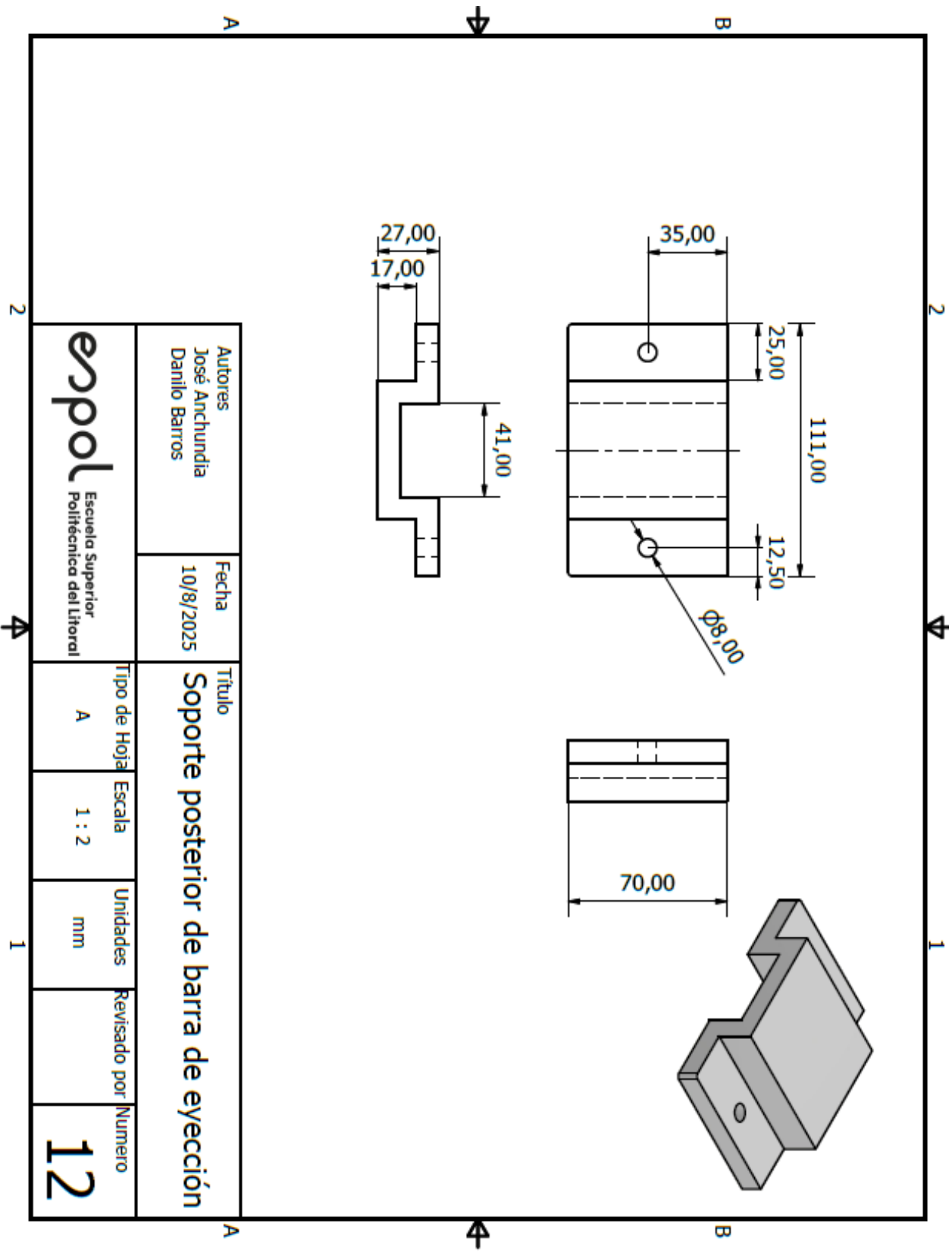








Autores José Anchundia Danilo Barros		Fecha 10/8/2025		Título Soporte de barra de eyección		
espol Escuela Superior Politécnica del Litoral		Tipo de Hoja A	Escala 1 : 2	Unidades mm	Revisado por 	Numero 11



Autores José Anchundia Danilo Barros		Fecha 10/8/2025	Título Soporte posterior de barra de eyección			
espol Escuela Superior Politécnica del Litoral		Tipo de Hoja A	Escala 1 : 2	Unidades mm	Revisado por	Numero 12

