UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

FABRICACIÓN DE MÁQUINA AUTOMATIZADA SELECCIONADORA DE CAFÉ PERGAMINO PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO, EN TAMBORAPA PUEBLO-SAN IGNACIO.

TESIS PARA OPTENER EL GRADO ACADÉMICO DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Autor (es): Bach. Alex Mauriola Pintado

Bach. William Peña Maza

Asesor (es): Mg. Ing. Frans Fuentes Maza

Ing. Luis Miguel Llanos Sánchez

Línea de Investigación: Automatización y Control Industrial

JAÉN – PERÚ – 2026

Mauriola Pintado Alex Y Peña Maza William

FABRICACIÓN DE MÁQUINA AUTOMATIZADA SELECCIONADORA DE CAFÉ PERGAMINO PARA INCREMENTA...

Quick Submit

Quick Submit

Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3627529230

Fecha de entrega
14 ago 2026, 3:53 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
14 ago 2026, 3:57 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
MAURIOLA_PINTADO_ALEX-PEA_MAZA_WILLIAM_-_Alex_Mauriola.pdf

Tamaño del archivo
3.7 MB

119 páginas

17.387 palabras

107.290 caracteres

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Dra. María Meriehi Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

Escaneado con CamScanner

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

2%	Fuentes de Internet
0%	Publicaciones
2%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dra. María Marleni Torres Cruz

Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

Escaneado con CamScanner

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Ley de Creación Nº 29304
Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo Nº 002-2018-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 1. de ... julio .....del año 2026, siendo las 17:00. horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : Mg. Jaime Odar Honorio Acosta
Secretario : Mg. Mario Félix Olivera Aldana
Vocal : Mg. Juan Antonio Labrin Romero, para evaluar la Sustentación del Informe Final:

( ) Trabajo de Investigación
(X) Tesis
( ) Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: " FABRICACIÓN DE MÁQUINA AUTOMATIZADA SELECCIONADORA DE CAFÉ PERGAMINO PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO, EN TAMBORAPA PUEBLO-SAN IGNACIO"

Presentado por estudiante/egresado o Bachiller Alex Mauriola Pintado y William Peña Maza, de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(X) Aprobar ( ) Desaprobar (X) Unanimidad ( ) Mayoría

Con la siguiente mención:

a)	Excelente	18, 19, 20	( )
b)	Muy bueno	16, 17	(16)
c)	Bueno	14, 15	( )
d)	Regular	13	( )
e)	Desaprobado	12 ò menos	( )

Siendo las 18:00... horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Presidente

Secretario

Vocal

27

Escaneado con CamScanner

“Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, **Alex Mauriola Pintado**, egresado de la carrera Profesional de **Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la Facultad de **Ingeniería** de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con **DNI 71872605**.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

   “Fabricación de Máquina Automatizada Seleccionadora de Café Pergamino para Incrementar el Rendimiento, en Tamborapa Pueblo-San Ignacio”.
   Asesorado por **Frans Fuentes Maza y Luis Miguel Llanos Sánchez**.
   El mismo que presento bajo la modalidad de **Tesis** para optar; el Título Profesional/Grado Académico de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén 17 noviembre del 2026.



Alex Mauriola Pintado.

“Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, **William Peña Maza**, egresado de la carrera Profesional de **Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la Facultad de **Ingeniería** de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con **DNI 42001301**.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

   “Fabricación de Máquina Automatizada Seleccionadora de Café Pergamino para Incrementar el Rendimiento, en Tamborapa Pueblo-San Ignacio”.
   Asesorado por **Frans Fuentes Maza y Luis Miguel Llanos Sánchez**.
   El mismo que presento bajo la modalidad de **Tesis** para optar; el Título Profesional/Grado Académico de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén 17 noviembre del 2026.



ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS v

ÍNDICE DE ANEXOS vii

RESUMEN viii

ABSTRACT x

I. INTRODUCCIÓN xi

1.1 Antecedentes xi

1.2 Problemática xvii

1.2.1 Formulación del problema xix

1.3 Justificación xix

1.3.1 Justificación tecnológica xix

1.3.2 Justificación económica xix

1.3.3 Justificación social xx

1.3.4 Justificación ambiental xx

1.4 Objetivos xxi

1.4.1 Objetivo general xxi

1.4.2 Objetivos específicos xxi

II. MATERIAL Y MÉTODOS xxii

2.1 Objeto de estudio xxii

2.2 Ubicación Geográfica xxii

2.3 Métodos xxiii
2.3.1 Tipo de investigación xxiii
2.3.2 Nivel de investigación xxiv
2.3.3 Diseño de la investigación xxiv
2.3.4 Variables de la investigación xxiv
2.3.5 Método de la investigación xxv
2.3.6 Población, Muestra y Muestreo xxv
2.4 Procedimiento Metodológico xxvii
2.4.1 Visita técnica a campo y diagnóstico del proceso tradicional xxvii
2.4.2 Recolección de datos de campo xxix
2.4.3 Evaluación del proceso xxxii
2.4.5 Conceptualización del diseño xxxiii
2.4.6 Cálculos de diseño xxxiv
2.5 Fabricación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino. xxxviii
2.5.1 Herramientas e instrumentos xxxviii
2.5.2 Normas técnicas xxxix
2.5.3 Parte mecánica xl
2..5.4 Parte eléctrica xl
2.5.5 Parte de automatización xli

2.6 Evaluación del desempeño de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino respecto al método tradicional. xli

2.6.1 Evaluación mediante el método tradicional xli

2.6.2 Evaluación mediante la maquina automatizada. xlii

2.7 Elaboración manual de operación y plan de mantenimiento de la máquina automatizada. xliii

III. RESULTADOS xliv

3.1 Desarrollo del diseño xliv

3.1.1 Requerimientos del sistema xliv

3.1.2 Diagrama general del funcionamiento de la máquina xliv

3.1.3 Selección de Materiales xlvi

3.1.4 Diseño de la máquina automatizada lii

3.2 Desarrollo del sistema de Visión artificial. lvii

3.3 Fabricación y montaje de la máquina lxi

3.3.1 Parte mecánica lxi

3.4 Evaluación del desempeño de la máquina respecto al método tradicional lxvi

3.4.1 Resultados de campo del método tradicional lxvi

3.4.2 Resultados del método tradicional con una muestra de 15 kg de café pergamino. .. lxvii

3.4.3 Resultados de la máquina automatizada lxviii

3.4.4 Comparación entre método manual y método automatizado lxix

3.4.5 Comparación gráfica de los resultados lxx

3.5 Evaluación económica..... lxxii

3.6 Manual de operación de la máquina..... lxxv

3.6.1 Instrucciones de funcionamiento lxxv

3.6.2 Parámetros operativos..... lxxvi

3.6.3 Manual de mantenimiento de la máquina lxxvii

IV. DISCUSIÓN lxxviii

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES lxxx

5.1 Conclusiones lxxx

5.2 Recomendaciones..... lxxxii

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... lxxxiii

AGRADECIMIENTO lxxxvi

DEDICATORIA lxxxviii

ANEXOS xc

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables de la Investigación xxiv

Tabla 2 Registros de tiempos y rendimiento del proceso manual de selección xxxiii

Tabla 3 Datos para el diseño xxxv

Tabla 4 Máquinas utilizadas xxxviii

Tabla 5 Herramientas Utilizadas xxxix

Tabla 6 Requerimientos del sistema xliv

Tabla 7 Especificaciones de la lámina de acero xlvi

Tabla 8 Especificaciones técnicas del tubo de acero xlvii

Tabla 9 Propiedades del Teensy 4.1 xlviii

Tabla 10 Especificaciones del sensor RGB (Cámara) xlix

Tabla 11 Especificaciones del lente xlix

Tabla 12 Propiedades del Mosfet N l

Tabla 13 Especificaciones de la electroválvula li

Tabla 14 Características del motor Hp li

Tabla 15 Jornada diaria de selección manual de café pergamino lxvi

Tabla 16 Jornaleros para 15 kilos lxvii

Tabla 17 Prueba de selección con máquina automatizada lxviii

Tabla 18 Comparación método manual y método automatizado lxix

Tabla 19 Comparación económica lxxiii

Tabla 20 Comparación de costo por kilogramo lxxiii

Tabla 21 Características de la máquina automatizada lxxv

Tabla 22 Parámetros Operativos lxxvi

Tabla 23 Manual de Mantenimiento lxxvii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación nacional del área de estudio xxii

Figura 2 Ubicación geográfica del Caserío San Miguel, (Centro Poblado Tamborapa Pueblo) xxiii

Figura 3 Diagrama del proceso del café con la etapa de intervención xxviii

Figura 4 Movimiento del grano xxx

Figura 5 Selección de granos defectuosos xxxi

Figura 6 Diagrama de flujo del funcionamiento de la maquina automatizada xlv

Figura 7 Diseño de máquina automatizada general lii

Figura 8 Diseño de tolva liii

Figura 9 Diseño de estructura de soporte liv

Figura 10 Diseño para el soporte del sistema de automatización lv

Figura 11 Diagrama general eléctrico lvi

Figura 12 Diagrama de Flujo Adquisición y Procesamiento de Imagen lviii

Figura 13 Captura de imagen del grano de café lix

Figura 14 Clasificación por color lx

Figura 15 Estructura de la máquina lxi

Figura 16 Fabricación de la tolva lxii

Figura 17 Canal de distribución de grano lxiii

Figura 18 Caja de acople para la cámara y válvulas lxiv

Figura 19 Máquina final lxv

Figura 20 Comparación del tiempo de clasificación entre el método manual y automatizado .. lxx

Figura 21 Comparación de la capacidad de procesamiento entre el método manual y automatizado lxxi

Figura 22 Comparación del rendimiento final del café pergamino lxxi

Figura 23 Mejora del rendimiento de calidad del café pergamino lxxii

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Visitas a campo agricultor 1.....xc

Anexo 2 Visitas a campo agricultor 2.....xc

Anexo 3 Resultados del cuestionario aplicado xci

Anexo 4 Registro de recolección de datos en campo xcii

Anexo 5 Ficha técnica de rendimiento inicial de la muestra de 15 kg xciii

Anexo 6 Ficha técnica de resultado del rendimiento en calidad por método manual xciv

Anexo 7 Ficha técnica de resultado del rendimiento en calidad por método automático xcv

Anexo 8 Planos de estructura mecánica de la máquina (cotas en milímetros)..... xcvi

Anexo 9 Diagrama del circuito de control..... cvi

Anexo 10 Evidencias de fabricación de la máquina..... cvii

Anexo 11 Código fuente del sistema de visión artificial..... cxi

Anexo 12 Código de control para Teensy 4.1 cxvii

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo fabricar una máquina automatizada seleccionadora de café pergamino para incrementar el rendimiento de calidad del producto en el Caserío San Miguel Tamborapa Pueblo, San Ignacio; mediante el desarrollo del diseño técnico, fabricación, evaluación del desempeño y la elaboración del manual de operación y plan de mantenimiento; el estudio respondió a la problemática identificada en el Caserío San Miguel, donde la selección de granos defectuosos de café pergamino se realiza de forma manual, generando mayor demanda de tiempo operativo, variabilidad en la clasificación, fatiga física y visual en los productores, así como permanencia de granos defectuosos en el producto final. La metodología correspondió a una investigación aplicada, de nivel tecnológico aplicativo, enfoque cuantitativo y diseño preexperimental; para la evaluación del método tradicional se realizaron dos pruebas con muestras independientes de 15 kg cada una, extraídas del mismo lote homogéneo de café pergamino; así mismo la máquina integró una tolva de alimentación, un sistema de transporte del grano hacia la zona de inspección, visión artificial mediante procesamiento de imágenes en Python, un controlador Teensy 4.1 y electroválvulas neumáticas para la expulsión de granos defectuosos. Los resultados evidenciaron que el método manual incrementó el rendimiento de calidad del café pergamino de 72 % a 78 %, con un tiempo promedio de clasificación de 64.5 minutos por cada 15 kg, mientras que la máquina automatizada alcanzó un rendimiento final de calidad del 85 %, reduciendo el tiempo de clasificación y mejorando la uniformidad del proceso. En conclusión, la fabricación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino permitió mejorar el rendimiento de calidad del producto bajo las condiciones evaluadas durante las pruebas preexperimentales.

Palabras claves: Café pergamino, automatización, clasificación, máquina automatizada.

ABSTRACT

The objective of the research was to build an automated parchment coffee sorting machine to improve product quality in the village of San Miguel Tamborapa, San Ignacio; this involved developing the technical design, manufacturing the machine, evaluating its performance, and preparing an operating manual and maintenance plan; The study addressed the problem identified in the village of San Miguel, where the sorting of defective parchment coffee beans is done manually, resulting in increased operational time, variability in classification, physical and visual fatigue among producers, as well as the presence of defective beans in the final product.

The methodology involved applied research at the applied technology level, using a quantitative approach and a pre-experimental design; to evaluate the traditional method, two tests were conducted using independent samples of 15 kg each, taken from the same homogeneous batch of parchment coffee; The machine incorporated a feed hopper, a system for transporting the beans to the inspection area, computer vision using image processing in Python, a Teensy 4.1 controller, and pneumatic solenoid valves for ejecting defective beans. The results showed that the manual method increased the quality yield of parchment coffee from 72% to 78%, with an average sorting time of 64.5 minutes per 15 kg, while the automated machine achieved a final quality yield of 85%, reducing sorting time and improving process uniformity. In conclusion, the manufacture of the automated parchment coffee sorting machine improved the product's quality yield under the conditions evaluated during the pre-experimental tests.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Prieto Rodríguez, (2024) realizó una investigación en Colombia titulada “Sistema de clasificación multiclase de granos individuales de café utilizando inteligencia artificial”, cuyo objetivo fue implementar un sistema de clasificación de imágenes para identificar diferentes tipos de granos utilizando un modelo de inteligencia artificial. La investigación se desarrolló de manera práctica, utilizando redes neuronales convolucionales (CNN) implementadas en Keras y TensorFlow, entrenadas con 3000 imágenes de variedades de café como Peaberry, Longberry, Premium, Castillo, Chiroso y granos defectuosos, las imágenes fueron capturadas con cámaras digitales de 12-20 MP y una alta resolución de 2992*2992 pixeles y fueron redimensionadas a una resolución de 256*256 píxeles para realizar 3 entrenamientos; el primer entrenamiento alcanzó una precisión del 70% ,el segundo supero el 90% de precisión con pérdidas reducidas y el tercero logró 100% de precisión, el procesamiento se realizó en un computador con GPU (INVIDIA GTX de 16 GB de RAM y SSD de 512 GB, con un costo de 1500 a 2000 USD. Finalmente, se concluyó que la implementación de la inteligencia artificial para la selección de granos de café presentó una alta precisión lo que ofreció una solución eficaz y pudo constituirse en un método valioso para la industria del café. Este antecedente fue considerado como base para desarrollar el algoritmo del prototipo, considerando los niveles de precisión logrados con inteligencia artificial en la selección de defectos en los granos de café.

Cortés Duran, (2020) realizó una investigación experimental en Colombia sobre la “Evaluación de implementación de los monitores de clasificación en la producción de café pergamino seco en el municipio de confines, Santander”. La investigación tuvo como objetivo evaluar el rendimiento y comparar los costos entre los diferentes métodos de clasificación. Los

resultados obtenidos fueron la construcción de un monitor TIMAG capaz de procesar 600 kg/hora, aquí se utilizaron 30 muestras de café variedad castilla sin clasificar, que fueron sometidas a tres tratamientos sin clasificación, clasificación manual por zarandeo y clasificación con monitores donde se pudo deducir que el porcentaje de defectos arrojados por el monitor fue del 2.85 %, mientras que de forma manual por zarandeo fue del 4.69% de error al seleccionar el grano trillado y defectuoso, para la construcción se utilizó un motor trifásico con transmisión por poleas, lamina calibre 14, zarandas metálicas de calibre 20 con esferas de goma de, 1 1/8´´, poleas de hierro fundido, acero angular de 2 ½´´ *1/4´´ . Se concluyó que la clasificación de café a través de monitores reduce el tiempo de operación manual y a su vez reduce el costo hasta en un 91% del proceso. Este antecedente permitió establecer criterios de comparación entre el rendimiento y los costos operativos del método manual y máquina seleccionadora propuesta.

Gonzabay Jiménez, (2023) realizó una investigación experimental sobre el "Procesamiento de imágenes para la clasificación de granos de café por forma y color". La investigación se enfocó en el desarrollo y evaluación de algoritmos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) para la clasificación de granos de café en buen o mal estado. Trabajó con una muestra de 3000 imágenes de granos de café dividida ente un 80% para entrenamiento y un 20% para validación, procesadas en cámaras RGB. Los resultados evidenciaron una mejora considerable en la precisión, ya que el MobileNetV2 tuvo una precisión del 99.18% y una validación del 99.20% mientras el modelo MobileNetV1 tuvo una precisión del 88.72% y una validación del 81.25%. Se utilizó herramientas como Python, TensorFlow, Keras, y OpenCV. Finalmente se concluyó que el diseño experimental MobileNetV2 es mayor eficiente en la selección de granos defectuosos. Este antecedente fue considerado como referencia para seleccionar el modelo de algoritmo aplicado al procesamiento de imágenes en la selección de granos defectuosos, considerando su alta precisión.

En la universidad Nacional de Yunlin de Ciencia y Tecnología Chang y Huang, (2021) realizaron una investigación denominada “Modelo de aprendizaje profundo para la inspección de defectos en granos de café”, cuyo objetivo fue desarrollar un algoritmo de aprendizaje profundo que permita seleccionar los defectos en los diferentes granos de café, llegando a tomar como muestra de la imagen de los granos defectuosos. En la investigación se indicó que la clasificación fue de 8 tipos de granos defectuosos a través de imágenes y tuvo una eficiencia del 95,1%, mientras que en la modelación para detectar la presencia de granos defectuosos la clasificación fue al 100%. El sistema fue implementado con Python utilizando librerías de visión computacional, procesando imágenes de 112*112 pixeles, además se utilizó cámaras industriales (ICDA-asA720-290gc y ICDA-acA1920-50gc) y un panel de luz uniforme. Finalmente se concluyó que el modelo propuesto por los investigadores evidencio precisión y eficiencia para la detección de los defectos para los granos de café pergamino. Este antecedente fue útil para orientar el diseño de un sistema que priorice la detección especifica de defectos mediante algoritmos de aprendizaje profundo.

Tan et al., (2024) en Taiwán realizaron una investigación experimental acerca de “Herramientas de línea de comandos para la identificación de granos de café verde”, que tuvo como objetivo desarrollar una máquina de clasificación de bajo costo para granos de café verde, que llegue a beneficiar a pequeños y grandes productores de café durante la evaluación de los granos. La investigación tomo como muestra tres lugares diferentes de cultivo y un modelo de aprendizaje automático basado en máquinas de vectores de soporte (SVM), además la programación se realizó en Python lo que permitió que el sistema GCBICT alcanzara una precisión de 92.39%. El modelo fue entrenado con 365 muestras y validado con 80, lo que les permitió obtener un resultado eficiente de un 87.88% de clasificación correcta y taza de precisión durante la selección de granos defectuosos. Finalmente, se concluyó que el color de las capas en los granos

de café verde pudo proporcionar un interfaz de evaluación fácil para detectar los granos calificados y granos defectuosos. Aporto criterios para definir las estrategias de diseño económico y a incorporar parámetros de evaluación basados en la selección de granos defectuosos.

Gómez & Luna, (2023) realizaron un investigación descriptiva y experimental titulada "Diseño y construcción de un prototipo de maquina seleccionadora de café pergamino seco para el corregimiento de Matituy la Florida Nariño". Esta investigación tuvo como objetivo automatizar el proceso de selección de café pergamino seco para mejorar la calidad de grano y reducir los costos operativos de mano de obra. El resultado obtenido fue la fabricación de una maquina semiautomática capaz de procesar 60 kg de café en un tiempo de 15 a 20 minutos logrando una uniformidad y eficiencia en la selección. Además, para su diseño se utilizó el software de SolidWorks, AutoCAD y LibreCAD, y para su fabricación se emplearon materiales como láminas de acero inoxidable, acero 1045 para ejes, ángulos metálicos LAC, cribas clasificadoras de 4.00 mm a 8.00 mm (cribas N° 10 a N° 20) tolvas metálicas y un motor monofásico de 0.45HP, el costo total fue de S/ 5742.69. Finalmente se concluyó que la máquina fue una mejora significativa en la tasa de rendimiento del café y en la disminución de personal para la selección de granos. Esta investigación fue considerada como base técnica para diseñar y seleccionar el tipo de material a utilizar durante la investigación.

En la tesis realizada por Campos y Capuñay, (2022) en la universidad César Vallejo de Chiclayo se realizó una investigación para la: "Automatización con PLC del proceso de trillado de café para planta cafetalera del norte", tuvo como objetivo diseñar un sistema automatizado de trillado de café para la planta cafetalera. El tipo de investigación fue aplicada teniendo un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental, identifico como principales problemas la humedad y temperatura, así como el control manual en las etapas de secado, pilado y selección. Se implemento

un sistema de control con PLC TM221CE40R y una HMI HMIGTO3510, permitiendo la automatización de 32 motores. Además, se implementó sensores de humedad y temperatura con sistemas neumáticos para compuertas y controles PID para el secado, su evaluación económica fue de S/ 24397.99. Los resultados obtenidos en esta investigación indicaron que las diferentes etapas de procedimientos que pasaba el café son los principales causantes de la baja calidad del producto, sin embargo, con la automatización de las maquinas mejorara la eficiencia del producto. Fue considerado para la incorporación de sistemas automatizados orientados a mejorar el proceso de selección de granos defectuosos.

Espinoza Villafuerte, (2019) realizó una investigación denominada: "Diagnostico automatizado para la clasificación de café trillado mediante el procesamiento de imágenes con Deep Learnig", una investigación de tipo propositiva y aplicada con los agricultores del Distrito de Ocobamba, Cusco. Tuvo como objetivo diagnosticar automáticamente la clasificación de café trillado y con broca utilizando técnicas de visión computacional. Para ello se desarrolló un modelo algorítmico empleando redes neuronales convolucionales y técnicas de procesamiento de imágenes con OpenCV, Keras y Python. Además, se utilizaron módulos de adquisición de imágenes con cámara microscópica y un motor de 12V para el desplazamiento mecánico del sistema. Los resultados encontrados en esta investigación indicaron que existe la eficiencia de calidad es considerable ya que se concluyó que los resultados obtenidos son de un 96% de eficiencia en la clasificación de granos defectuosos y un margen de error del 4%. El gasto total del proyecto fue de S/ 1520. Este antecedente permitió fundamentar la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo para mejorar la selección de granos defectuosos.

En la universidad Pontificia Católica del Perú (Susanibar et al., 2021) desarrollaron una investigación acerca del "Desarrollo de una maquina automatizada para la selección de granos de

café verde por tamaño y defectos". Esta investigación tuvo como objetivo optimizar el tiempo y aumentar la calidad del producto final. La investigación fue con un diseño de una máquina experimental llegando a clasificar los granos de café en forma mecánica y automática para la detección de granos defectuosos. Se utilizaron dos motores de 24V con codificadores para accionar el matiz de 25 RPM y la cinta transportadora, además de cinco servomotores SG90 para las compuertas de selección. El sistema de visión utilizó dos cámaras y procesamiento en tiempo real mediante un Raspberry Pi3 y un Arduino mega. Los resultados obtenidos mostraron que la clasificación mecánica por defectos físicos tuvo un 80% de precisión mientas que la clasificación automática por tamaño alcanzo una precisión del 96% de eficiencia en mejora de calidad y rendimiento del producto. El sistema fue construido con estructura de acero ASTM A36 y tamiz de acero inoxidable AISI 304L que tuvo un costo total de S/ 2200. Finalmente se concluyó que una maquina automática fue más eficiente ya que requirió mínima intervención humana y su desempeño fue muy eficiente para cualquier agricultor. Este antecedente fue utilizado como referencia para el diseño mecánico de la máquina seleccionadora, enfocándose en reducir la intervención manual.

León et al., (2024) pertenecientes a la Universidad Privada del Norte Trujillo realizaron una investigación sobre el "Desarrollo de un Software con Visión Artificial para Detectar el Defecto Físico del Grano de Café Verde". Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un software con visión artificial para detectar el defecto físico del grano de café verde en el área de calidad para la exportación. El sistema utilizo una red entrenada con imágenes clasificadas como aptas y no aptas; que fueron capturadas con una cámara de iPhone 13 dentro de una caja de iluminación LED de 36w, también se utilizó un motor DC de 12v, aluminio y sensores compatibles con microcontroladores llegando a obtener un gasto de S/ 2500. Los resultados obtenidos

mostraron que en las pruebas realizadas para granos aptos la eficiencia fue del 93% de eficiencia y el error fue del 7%, mientras que al realizar las pruebas para los granos no aptos la eficiencia fue de 92% y su margen de error fue del 8 %. En conclusión, el proyecto alcanzo exitosamente el desarrollo del software con visión artificial para detectar los defectos físicos del grano de café verde, generando una mayor calidad en los productos de exportación. Este antecedente fue considerado como guía para la integración de visión artificial en el diseño del prototipo asegurando tener resultados óptimos en la selección.

1.2 Problemática

Los productores de café tanto en Colombia y Brasil han incorporado tecnologías nuevas, como máquinas automáticas utilizando sensores ópticos para la selección de granos defectuosos, esto les ha permitido reducir considerablemente el porcentaje de granos defectuosos y ha generado una mayor eficiencia y competitividad en el mercado internacional ya que estos valoran la calidad y consistencia del producto obtenido (International Coffee Organization, 2021). Además Puerta, (2016) nos afirma que en Colombia los cafés calificados como especiales tienen un porcentaje cercano al 2% de granos defectuosos y los cafés con sabores indeseables, como contaminado, sucio, fermento y terroso tienen un promedio del 11% de granos defectuosos y Brasil tiene un 10 % de granos brocosos.

Aproximadamente el 80% del café producido en el Perú tiene un proceso artesanal, donde se dice que el total de café producido tiene el 5.5% de granos defectuosos, el 3 % de granos con cascara y el 0.5% son impurezas, lo que causa que se obtenga granos defectuosos, disminución en el rendimiento del café producido y pérdida de valor en el mercado internacional, esta problemática se debe a la falta de herramientas tecnológicas tales como maquinas seleccionadoras automáticas del grano de café y la falta de los diferentes métodos que existen en el mundo para la producción

de un producto de calidad y lograr competir al nivel internacional en los mercados más exigentes (Díaz y Carmen, 2017).

Según la Tirado y Luján, (2022) afirman que en Cajamarca existe el 3 % de granos pelados sin endocarpio, el 3% café con cascara y el 0.5 % de impurezas extrañas. Además el plan de desarrollo regional concertado de Cajamarca 2021-2025 informa que los productores tienen un acceso del 10% a las tecnologías avanzadas en el ámbito de selección del producto, lo que causa una limitación en la competitividad de los mercados nacionales e internacionales, además este informe destaca que la inversión en tecnología agrícola es insuficiente en la región y esto afecta considerablemente la eficiencia del productor cafetalero ya que no les permite producir un producto de calidad es por ello que los productores realizan sus procesos de producción de manera artesanal. (Gobierno Regional de Cajamarca, 2021)

En el ámbito local, el café pergamino utilizado en la presente investigación procedió del Caserío San Miguel perteneciente al Centro Poblado Tamborapa Pueblo, Distrito Tabaconas, Provincia San Ignacio, Región Cajamarca, zona ubicada aproximadamente a 1812 m. s. n. m. Durante el diagnóstico de campo se identificó que los productores presentaban limitaciones en la etapa de postcosecha, principalmente en la selección de granos defectuosos de café pergamino, proceso que se realiza de forma manual y depende de la experiencia visual del trabajador. Esta condición genera variabilidad en la clasificación, mayor demanda de tiempo operativo y permanencia de granos defectuosos en el producto final, afectando la uniformidad, el rendimiento de calidad y la competitividad comercial del café producido en la zona.

Así mismo se evidencio que la selección manual requería un mayor esfuerzo físico y visual por parte de los agricultores, especialmente cuando el volumen del café a clasificar era elevado, ocasionando una mayor fatiga durante la jornada de trabajo y disminución progresiva en la

precisión de selección de granos defectuosos. Frente a esta problemática, se planteó desarrollar la fabricación de una máquina automatizada seleccionadora de granos defectuosos de café pergamino, con la finalidad de mejorar la uniformidad de clasificación, reducir dependencia del trabajo manual y contribuir al incremento del rendimiento de calidad del café pergamino producido por los agricultores del Caserío San Miguel.

1.2.1 Formulación del problema

¿De qué manera la fabricación de una máquina automatizada seleccionadora de granos defectuosos incrementa el rendimiento de calidad del café pergamino, procedente del caserío San Miguel Tamborapa Pueblo-San Ignacio?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación tecnológica

La presente investigación se justificó tecnológicamente porque permitió incorporar una alternativa automatizada al proceso de selección de café pergamino, mediante el diseño de fabricación y evaluación de la máquina integrada por sistemas mecánicos, eléctricos, y de control. Esta propuesta se desarrolló para reducir la dependencia del método manual, mejorar la uniformidad en la clasificación de granos defectuosos y verificar su funcionamiento con una muestra preexperimental de 15 kg procedentes del caserío San Miguel, permitiendo analizar su aporte en el incremento del rendimiento de calidad del café.

1.3.2 Justificación económica

El estudio se justificó económicamente porque la selección manual de granos defectuosos de café pergamino demanda mayor tiempo operativo y mano de obra, lo que incrementa los costos del proceso postcosecha. Por ello la máquina automatizada representó una alternativa tecnológica

orientada a reducir el tiempo de clasificación, optimizar el aprovechamiento del café seleccionado y mejorar el rendimiento de calidad del producto, con la finalidad de favorecer su valorización comercial y generar mejores condiciones económicas al productor.

1.3.3 Justificación social

La propuesta tecnológica se justificó socialmente porque a una necesidad concreta de los del Caserío San Miguel, quienes realizan la selección de granos defectuosos de café pergamino de forma manual, generando mayor carga operativa, tiempo de trabajo y variabilidad en la clasificación. La fabricación de la máquina automatizada permitió aportar una alternativa técnica orientada a reducir el esfuerzo del agricultor, mejorar la uniformidad del proceso de selección y fortalecer las actividades postcosecha, con la finalidad de contribuir al incremento del rendimiento de calidad del café pergamino.

1.3.4 Justificación ambiental

La investigación se justificó ambientalmente porque la selección adecuada de granos defectuosos de café pergamino contribuyo al mejor aprovechamiento del producto cosechado, al permitir separar aquellos granos que no cumplían con las condiciones requeridas de calidad y reducir las pérdidas generadas durante el proceso postcosecha. En ese sentido, la fabricación de la máquina permitió optimizar la clasificación del producto, favorecer el uso racional de los recursos agrícolas y disminuir la generación de residuos derivados de una selección deficiente, con la finalidad de aportar a la mejora del proceso productivo bajo un enfoque de sostenibilidad ambiental.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Fabricar una máquina automatizada seleccionadora de café pergamino para incrementar el rendimiento de calidad del producto, en Tamborapa Pueblo-San Ignacio.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el diseño técnico de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino, a partir de la información recopilada.
- Fabricar la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino.
- Evaluar el desempeño de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino respecto al método tradicional.
- Elaborar manual de operación y plan de mantenimiento de la máquina automatizada.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Objeto de estudio

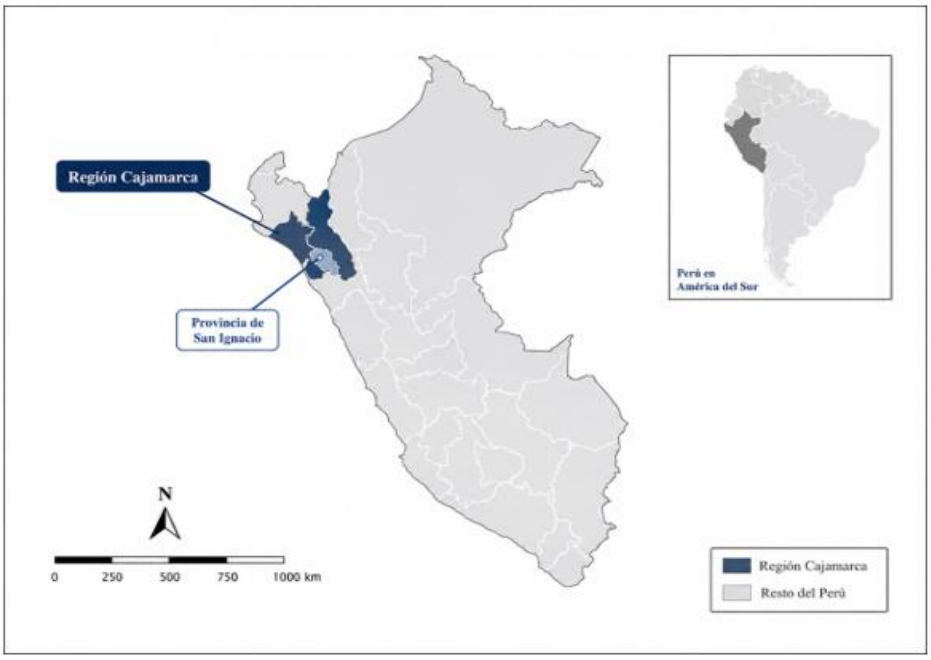
El objeto de estudio de la presente investigación estuvo constituido por la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino, diseñada y fabricada para la separación de granos defectuosos, con la finalidad de mejorar el rendimiento de calidad del café y optimizar el tiempo de clasificación en el Caserío San Miguel, Tamborapa Pueblo San Ignacio.

2.2 Ubicación Geográfica

La investigación se desarrolló en el Caserío San Miguel, centro Poblado Tamborapa Pueblo, distrito de Tabaconas, provincia San Ignacio, Región Cajamarca.

Figura 1

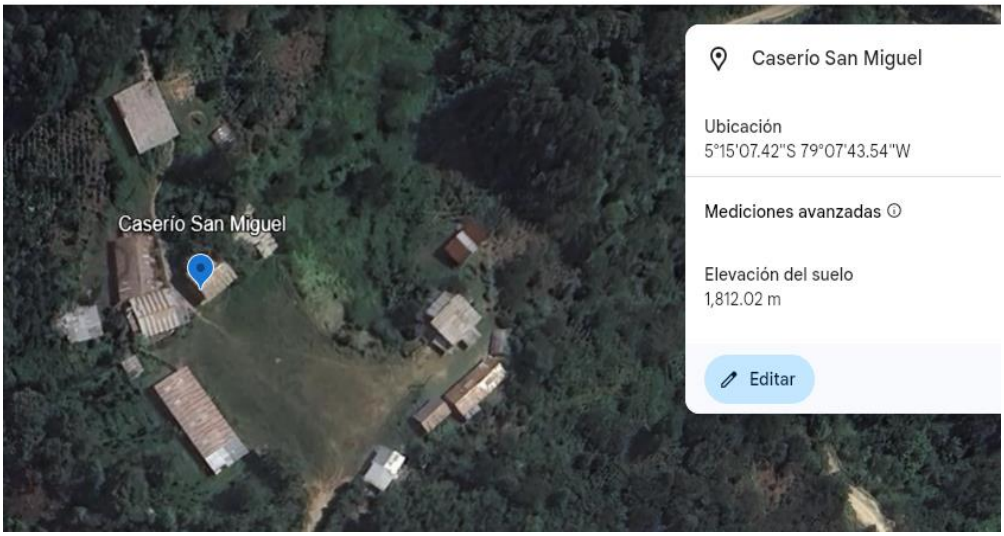
Mapa de ubicación nacional del área de estudio



Nota: La figura muestra la ubicación nacional del área de estudio, identificando la región Cajamarca dentro del territorio peruano y la provincia de San Ignacio como zona de referencia para el desarrollo de la investigación.

Figura 2

Ubicación geográfica del Caserío San Miguel, (Centro Poblado Tamborapa Pueblo)



Nota: La figura muestra la ubicación y elevación del terreno en donde se instaló la máquina automatizada. Fuente: Google Earth Pro (2026).

2.3 Métodos

2.3.1 Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que para el diseño y fabricación de una máquina automatizada seleccionadora de café de granos defectuosos se utilizó conocimientos científicos, mecánicos, automatización y formulas aplicadas por otros investigadores lo que permitió mejorar el rendimiento de café en el caserío San Miguel y validar datos mediante ensayos preexperimentales, midiendo variables como el tiempo, precisión y reducción de errores en la clasificación de café pergamino. Según Hernández, (2014) afirma que la investigación aplicada busca resolver problemas concretos utilizando conocimientos científicos previamente establecidos, en tal sentido que el estudio realizado no pretenda generar nuevas teorías, sino aplicar teorías de ingeniería y automatización.

2.3.2 Nivel de investigación

La investigación correspondió al nivel tecnológico aplicativo, debido a que tuvo como finalidad resolver un problema práctico mediante el diseño, fabricación y evaluación de la máquina seleccionadora de granos defectuosos. Según Hernández, (2014) la investigación aplicada busca resolver problemas concretos utilizando conocimientos científicos previamente establecidos, en tal sentido que el estudio realizado no pretenda generar nuevas teorías, sino aplicar teorías de ingeniería y automatización.

2.3.3 Diseño de la investigación

La investigación fue preexperimental debido a que se evaluó el desempeño de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino mediante ensayos con una muestra definida, comparando el método tradicional y método automatizado, sin considerar un grupo de control aleatorizado. Así mismo tuvo un enfoque cuantitativo porque se recolectaron y analizaron datos numéricos como el tiempo de clasificación, capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad del café pergamino. Según Hernández, (2014) este enfoque permite medir variables y analizar resultados de manera objetiva y secuencial.

2.3.4 Variables de la investigación

Tabla 1
Variables de la Investigación

Tipos de Variables	Variables	Indicadores
Variable Independiente	Método de selección del café pergamino	Método manual Método automatizado
Variable Dependiente	Rendimiento del café pergamino	Tiempo de clasificación Capacidad de procesamiento

Nota: Elaboración propia (2026).

2.3.5 Método de la investigación

El método de la investigación fue inductivo, debido a que el estudio partió de la observación de un problema específico en el caserío San Miguel, donde se observó que la selección de granos defectuosos se realizaba manualmente, generando una elevada tasa de error que llega a afectar la calidad y rendimiento del café pergamino. Según Hernández, (2014) el método inductivo parte desde las observaciones y experimentación para llegar a conclusiones generales a partir de un problema específico.

2.3.6 Población, Muestra y Muestreo

La población: Estuvo conformada por lotes de café pergamino producidos por los agricultores del Caserío San Miguel, del Centro Poblado Tamborapa Pueblo, incluyendo las diferentes variedades producidas en la zona tales como, Caturra, Catimor, Bourbon, entre otras.

Muestra: La muestra estuvo constituida por dos submuestras de 15 kg de café pergamino procedente del Caserío San Miguel, extraída de un lote homogéneo para realizar las pruebas preexperimentales bajo condiciones similares de calidad y características físicas del producto.

Muestreo: Fue no probabilístico intencional, debido a que la muestra fue seleccionada deliberadamente considerando la disponibilidad del café pergamino, la representatividad del producto utilizado en la zona y las condiciones necesarias para la ejecución de las pruebas preexperimentales. Hernández González, (2021) en el muestreo no probabilístico intencional la selección de los elementos se realiza de acuerdo a criterios definidos por el investigador.

OE1. Desarrollo del diseño técnico de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino, a partir de la información recopilada.

Técnicas para la recolección de datos.

- Se buscó información bibliográfica en artículos, libros, tesis de grado, normativas y luego se seleccionó la información relevante para la investigación.
- Se realizó visitas técnicas a campo para identificar las condiciones del proceso tradicional de selección de café pergamino en el caserío San Miguel.
- Se realizó medición durante los ensayos preexperimentales, registrando datos como cantidad de café procesado, tiempo de clasificación, capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad del café pergamino.
- Se utilizó registro en fichas de control donde se anotaron los datos obtenidos en cada prueba.
- Se realizó registros fotográficos como evidencia del proceso de selección manual, funcionamiento de la máquina automatizada y el desarrollo de las pruebas preexperimentales.

Materiales y equipos

Los materiales, equipos y programas empleados fueron seleccionados de acuerdo a los requerimientos necesarios para la fabricación e implementación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino. Estos componentes comprendieron partes mecánicas, componentes eléctricos y de control de la máquina.

Materiales: para el desarrollo técnico de la maquina automatizada seleccionadora de café pergamino se consideraron materiales destinados a la estructura y al sistema mecánico de la maquina tales como acero inoxidable, tubo estructural metánico y planchas de acero inoxidable.

Equipos: Se utilizó equipos como laptop, cronómetro, balanza digital, cámaras RGB industrial, sistemas de iluminación led, microcontrolador Teensy 4.1, MOSFET D4184, electroválvulas neumáticas.

Software: Para el diseño y desarrollo técnico se utilizaron softwares tales como SolidWorks, AutoCAD, Python, librería OpencCv, Microsoft Exel, Word Office, Mendeley.

Normas técnicas utilizadas: Para el diseño técnicos de máquina automatizada se consideraron normas y criterios técnicos relacionados con el diseño mecánico, seguridad, representación de planos e instalaciones eléctricas. Se tomo como referencia la norma ANSI/ASAE S413.1 para criterios de diseño de tolvas, normas ISO de dibujo técnico para la representación de planos, criterios del Código Nacional de Electricidad.

Procedimiento: El procedimiento seguido para el desarrollo del diseño técnico se organizó considerando la información recopilada de en campo, los antecedentes relacionados con máquinas clasificadoras y criterios generales de diseño de ingeniería. En ese sentido el proceso comprendió la identificación del problema, visitas a campo, análisis del proceso manual, definición de requerimientos, diseño conceptual, selección de componentes, modelado, ensamblado y elaboración de planos técnicos.

2.4 Procedimiento Metodológico

2.4.1 Visita técnica a campo y diagnóstico del proceso tradicional

En esta fase se realizó una visita técnica al Caserío San Miguel y se diagnosticó del proceso tradicional de selección de café pergamino, con el propósito de identificar las limitaciones operativas y los puntos críticos sucesibles de mejora mediante la automatización. Para ello se llevó a cabo un estudio de factibilidad técnica orientado a evaluar alternativas de diseño y fabricación

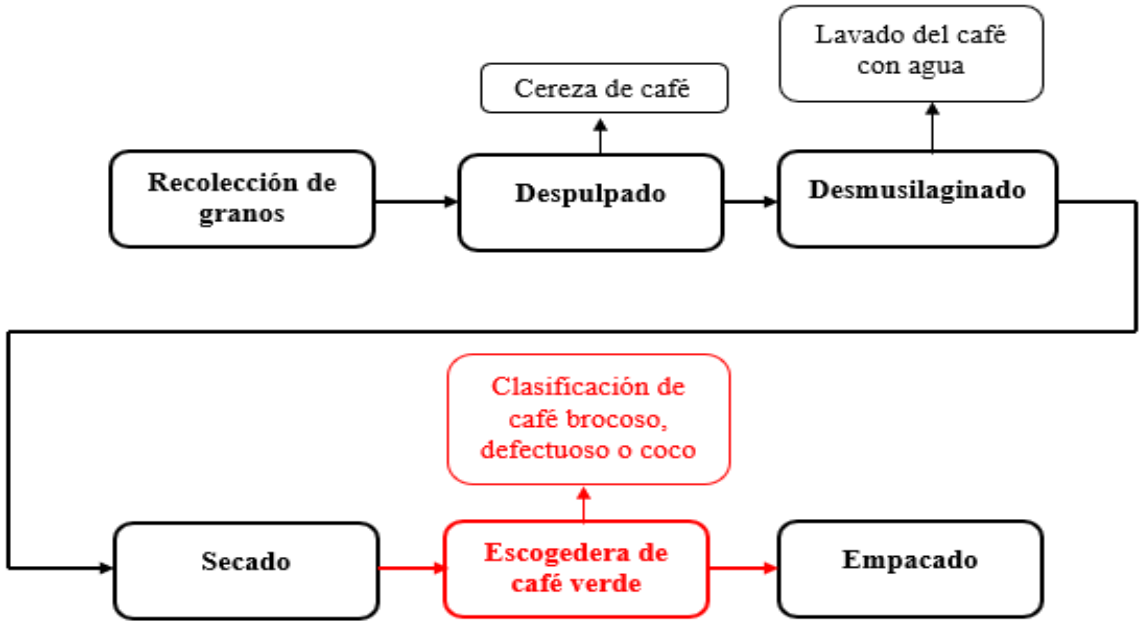
de una máquina automatizada para la selección de granos defectuosos considerando las condiciones reales del proceso para mejorar el rendimiento del café.

Posteriormente se evaluó el proceso productivo desde una perspectiva operativa y técnica, considerando las etapas de recolección, despulpado, lavado, secado, selección y empacado de café pergamino. Esta evaluación permitió identificar la etapa de selección de granos defectuosos como el punto de intervención, debido a que se concentra mayor participación manual, variabilidad en la clasificación y demanda de tiempo operativo. **Anexos (1,2)**

Como resultado del diagnóstico se elaboró un diagrama de flujo del proceso del café pergamino, en el cual se presentaron las principales etapas del proceso postcosecha y se único la fase de selección como punto de intervención para la integración de la máquina automatizada seleccionadora de granos defectuosos.

Figura 3

Diagrama del proceso del café con la etapa de intervención



Nota. La figura muestra las etapas del proceso para obtener el café pergamino y la etapa de intervención se encuentra de color rojo. Fuente: Elaboración propia (2026).

2.4.2 Recolección de datos de campo

La recolección de datos se desarrolló mediante visitas técnicas en campo a los agricultores de café pergamino ubicados en el Caserío San Miguel-Centro Poblado Tamborapa Pueblo, con el objetivo de observar directamente el proceso tradicional de selección manual del producto y obtener información directa de los agricultores para realizar el diseño técnico del sistema automatizado. Según Hernández, (2014) la investigación de campo se caracteriza por la recolección de datos de manera directa de los sujetos o fenómenos en su ambiente natural, sin manipulación de variables, lo cual permite describir y analizar lo que ocurre en el lugar de la investigación.

Durante esta etapa se recolectaron datos cuantitativos tales como el tiempo de clasificación (min), cantidad procesada (Kg) y rendimiento físico (%), así como datos cualitativos relacionados con los criterios visuales de selección (color, tamaño), condiciones de trabajo y limitaciones operativas del proceso manual. **Anexos (3;4;5;6;7)**

Procedimiento

Paso 1: Se identificó el área de estudio correspondiente al Caserío San Miguel, ubicado en el Centro Poblado Tamborapa Pueblo, distrito Tabaconas Provincia San Ignacio; esta localidad fue seleccionada por su actividad de producción y selección de café a través del método manual lo que permitió identificar el entorno real de cómo se ejecutaba el proceso de clasificación tradicional del producto por parte de los productores, garantizando que la información recopilada correspondiera a condiciones operativas reales.

Paso 2: Se realizaron visitas técnicas a los agricultores, donde se empleó la técnica de observación directa para registrar el proceso operativo y las actividades ejecutadas por los agricultores,

logrando así una comprensión de la secuencia real y el entorno de trabajo por parte de los agricultores.

Paso 3: Se realizó la toma de fotografías, lo cual permitió evidenciar las visitas a campo y el comportamiento del grano durante la manipulación y acciones ejecutadas por los operadores para la selección de granos defectuosos.

Figura 4

Movimiento del grano



Nota: En la figura se observa al operador realizando la selección manual de café pergamino sobre una zaranda de clasificación artesanal. Elaboración propia (2026)

Figura 5

Selección de granos defectuosos



Nota: En la figura se observa al operador seleccionando granos defectuosos sobre una zaranda artesanal mediante inspección visual y manipulación directa. Fuente: Elaboración propia (2026)

Paso 4: Se procedió con el registro de datos para medir los tiempos del proceso de selección manual utilizando un cronometro para medir el tiempo total de clasificación para una muestra de 15 kg de café pergamino por operador. Las mediciones se realizaron bajo condiciones similares de operación, manteniendo constante la cantidad de muestra, el entorno de trabajo y el procedimiento de clasificación, con el fin de garantizar la comparabilidad de los datos obtenidos. Previo al análisis de un especialista en evaluación de café determino que la muestra presentaba un rendimiento físico del 72% (presencia de defectos y mermas).

Paso 5: Tras haber finalizado el proceso de selección manual por parte de los productores del Caserío San Miguel se realizó nuevamente el análisis de rendimiento del café, obteniendo como porcentaje de rendimiento del 78%, este resultado mostro la capacidad manual para mejorar el rendimiento del producto mediante la eliminación de los granos defectuosos.

Paso 6: Se procedió a identificar los criterios visuales de clasificación empleados por los operadores para la discriminación de granos defectuosos, tales como color, tamaño y uniformidad; estos hallazgos permitieron establecer los parámetros para el desarrollo del algoritmo de visión artificial.

Paso 7: Posteriormente se identificaron las dificultades de los operadores al realizar la selección de forma manual, donde nos indicaron que tienen una baja eficiencia operativa y diferente variabilidad de los resultados en la calidad del café como también una constante fatiga en la cintura, espalda y los ojos de los trabajadores, factores que sustentaron que es necesaria la automatización.

Paso 8: Finalmente se procedió a organizar la información recopilada durante la visita a campo, incluyendo registros fotográficos, mediciones de tiempo y observaciones operativas, con el propósito de establecer el diseño mecánico y electrónico de la máquina seleccionadora automatizada.

2.4.3 Evaluación del proceso

El proceso de selección manual de café pergamino se evaluó con los agricultores del caserío San Miguel, utilizando dos submuestras homogéneas de 15 Kg, con la finalidad de establecer una línea base del método tradicional para su posterior comparación con la máquina automatizada , para ello la operación fue realizada por dos operadores bajo condiciones reales de trabajo, registrándose el tiempo total de clasificación mediante cronometro y considerando el rendimiento físico inicial y posterior a la separación de granos defectuosos. Asimismo, durante la evaluación se identificaron criterios visuales empleados por los operadores, tales como color, tamaño y uniformidad del grano, además de las condiciones operativas asociadas al proceso manual, entre ellas la variabilidad en el tiempo de selección y la presencia de fatiga física y visual. De esta

manera la información obtenida permitió caracterizar el desempeño del método tradicional y establecer criterios para el diseño y evaluación de la maquina automatizada seleccionadora de café pergamino.

Tabla 2

Registros de tiempos y rendimiento del proceso manual de selección

Operador	Cantidad de café pergamino seleccionado en kg	Rendimiento Inicial %	Tiempo de selección (Minutos)	Rendimiento Final %
Agricultor 1	15 kg	72 %	62 min	78 %
Agricultor 2	15 kg	72 %	67 min	78 %
Promedio	15 kg	72 %	64.5 min	78 %

Nota: Elaboración propia (2026)

Asimismo, para sustentar la evaluación del rendimiento de calidad del café pergamino, se elaboraron fichas técnicas de registro correspondiente a la muestra preexperimental de 15 kg. Estas fichas documentaron el rendimiento inicial de la muestra antes del proceso de selección, el rendimiento obtenido después de la selección manual y el rendimiento alcanzado después de la selección mediante la máquina automatizada. **(Anexo 5)**

2.4.5 Conceptualización del diseño

El diseño de la máquina automática seleccionadora de café pergamino se desarrolló mediante el uso del software SolidWorks, el cual permitió modelar los componentes principales del sistema y visualizar la disposición general de la máquina antes de su fabricación. Durante este proceso se desarrollaron elementos como la estructura del soporte, la tolva de alimentación,

sistema del transporte del grano, soporte de la cámara y el soporte de las electroválvulas permitiendo visualizar el funcionamiento general.

Diseño conceptual: Se desarrollo la secuencia operativa del flujo del grano dentro de la máquina, además se definió la disposición general del sistema, la ubicación de la tolva, el sistema de transporte, zona de inspección y los todos los elementos utilizados para el funcionamiento de la máquina.

Modelado de piezas: Consistió en la creación tridimensional de cada una de las piezas individuales donde se definieron dimensiones, espesores, geometría de la estructura, tolva y soportes.

Ensamblaje en SolidWorks: Se realizó integrando cada una de las piezas individuales diseñadas en SolidWorks y se comienza a agregar toso los componentes de acuerdo al diseño conceptual.

Ensamblaje de componentes: Permitió integrar las pizas mecánicas y elementos comerciales en un solo sistema funcional. Durante esta etapa también se verifico la correcta alineación de los componentes.

Generación de planos técnicos: Se realizo a partir del modelo tridimensional desarrollados en SolidWorks. Se obtuvieron las vistas principales, dimensiones y especificaciones necesarias para la fabricación.

Documentación final: Una vez concluido el diseño técnico en SolidWorks se genera una documentación completa de todos los planos para empezar la fabricación de la máquina automática seleccionadora de café pergamino.

2.4.6 Cálculos de diseño

Para el diseño se consideraron propiedades físico-mecánicas del café pergamino seco como la densidad de café pergamino según Gutiérrez Madrid, (2023), donde nos afirma que el café

pergamino seco con una humedad entre el 10% y 12% presenta una densidad aproximada de 450 kg/m^3 en granos de altura sobre los 1800 m.s.n.m. y a continuación se especifica la tabla de datos.

Tabla 3

Datos para el diseño

Variable técnica	Valor de diseño	Justificación
Densidad aparente ρ	450 kg/m^3	Relación masa/volumen para cálculos de recipientes
Angulo de reposo (Ø)	45°	Limite crítico para el diseño de pendientes
Capacidad de carga	15 kg	Carga nominal por ciclo de alimentación
Peso de grano seco	0.22 g	
Factor de seguridad del sobredimensionamiento neumático	1.30	
Factor de seguridad	1.20	

Nota: Datos cogidos de Cenicafé, (2008) (2013), y Gutiérrez Madrid, (2023).

Cálculos para el diseño de la tolva de alimentación

Para el diseño de la tolva de alimentación se consideró el café pergamino como material granular, cuya descarga por gravedad depende de la geometría de la tolva, ángulo de las paredes y propiedades físicas como el tamaño, forma y humedad del grano. Amorós et al., (2000) y Schulze, (2021) incluyen directamente el flujo de los sólidos a granel. Por eso el diseño de la tolva de alimentación se eligió realizar en forma de una pirámide truncada debido su eficiencia en la descarga de materiales granulares por gravedad y su facilidad de fabricación utilizando láminas de acero inoxidable y considerando un factor de seguridad del 20% (FS = 1.20).

Se determinó la masa de diseño considerando el factor de seguridad

$m_d = 15(1 + 0.20) = 18kg$

Cálculos realizados para hallar el volumen total de la tolva

$V_d = \left(\frac{m}{\rho}\right) = \left(\frac{18\ kg}{450kg/m^3}\right) = 0.040m^3$

Entonces el volumen de diseño requerido es de 40 litros para la tolva, garantizando un adecuado funcionamiento y flujo de material durante el proceso de alimentación.

Cálculo del caudal de alimentación

El caudal masico de operación se determinó a partir del procesamiento de los 15 kg de café pergamino en un tiempo de 16 minutos al ser controlado en tiempo real durante la prueba de selección.

$\dot{m} = \frac{15}{960} = 0.0156\ kg/seg$

Por lo tanto, el caudal masico considerado fue de $0.0156\ kg/seg$

Caudal volumétrico

$Q_V = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.0156}{450} = 3.47 * 10^{-5} m^3/s$

Convirtiendo a litros por minuto

$Q_V = 3.47 * 10^{-5} * 1000 * 60 = 2.08\ L/min$

Cálculo de la potencia del motor

Cálculo del torque considerando una masa de 1.5 kg debido a que el sistema rotatorio no moviliza todo el material.

$T = m * g * r$

$T = 1.5 * 9.81 * 0.0125 = 0.184\ N.m$

Aplicando un factor de seguridad de 2

$T_d = 0.184 * 2 = 0.368\ N.m$

Redondeando

$T_d = 0.40\ N.m$

Para la potencia mecánica se consideró 370 rpm

$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2*\pi*370}{60} = 38.75\ rad/s$

Luego se determina la potencia

$P = T * \omega = 0.368 * 38.75$

$P = 14.26\ w$

Considerando perdidas mecánicas se consideró utilizar un motorreductor de 40 W

Consumo de aire comprimido para las dos electroválvulas

Se determino la masa procesada por minuto

$\dot{m} = \frac{15}{16}$ = 0.9375 kg/min

Número aproximado de granos por minuto

$N_g = \frac{0.9375}{0.00022} = 4261\ ganos/min$

Granos defectuosos estimados por minuto

$N_d = 4261 * 0.28 = 1193\ granos/min$

Para cada válvula granos expulsados

$N_g = \frac{1193}{2} = 597\ expulsiones\ /min$

Considerando las especificaciones de las electroválvulas 90 l/min

$Q_v = \frac{90}{60}$ = 1.5 L/s

Considerando un tiempo de apertura de 0.05 segundos

$Q_{pulso} = 1.5 * 0.05 = 0.075\ L/pulso$

Consumo de aire por electroválvula

$Q_v = 398 * 0.075 = 29.85\ L/min$

$Q_v = 29.85\ * 2 = 59.7\ L/min$

Aplicando un factor de seguridad de 1.3

$Q_v = 59.7 *\ 1.3\ = 77.61\ L/min$

Por lo tanto, el sistema requiere de un caudal mínimo de diseño de aproximadamente 100 L/min debido a las pérdidas que pueden existir.

2.5 Fabricación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino.

2.5.1 Herramientas e instrumentos

Para la fabricación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino se utilizaron los siguientes equipos, máquinas y herramientas mecánicas que permitieron realizar los procesos de corte, soldadura, doblado, perforado, ajuste y acabado en componentes estructurales y funcionales de la máquina que se especifican en la tabla N° 4 y 5.

Tabla 4

Máquinas utilizadas

Máquinas
1. Soldadura TIG
2. Compresor
3. Torno
4. Dobladora Hidráulica

Nota: Elaboración propia (2026).

Tabla 5

Herramientas Utilizadas

Herramientas			
1.	Amoladora	11.	Lijadora
2.	Disco de corte	12.	Taladro
3.	Brocas de metal	13.	Juego de llaves
4.	Escuadra	14.	Desarmadores
5.	Regla	15.	Vernier
6.	Comba	16.	Pelacables
7.	Esmeril	17.	Tornillo y banco
8.	Careta de soldar	18.	Lentes de seguridad
9.	Guantes	19.	Protectores auditivos
10.	Wincha	20.	Alicate

Nota: Elaboración propia

2.5.2 Normas técnicas

Para la fabricación de la máquina se tomaron como referencia las normas técnicas relacionadas con seguridad de maquinaria, instalación eléctrica y sistemas neumáticos. La norma ISO 12100: 2016 se tomó como referencia para la identificación y reducción de riesgos mecánicos durante la fabricación y operación de la máquina. La norma IEC 60204-1:2016 se orientó a la instalación eléctrica, distribución de cableado, protección de conductores y conexión segura de los componentes eléctricos y electrónicos. La norma ISO 4414:2010 fue considerada para la instalación del sistema neumático incluyendo mangueras y electroválvulas.

2.5.3 Parte mecánica

La fabricación mecánica se inició con la habilitación de los materiales destinados a la estructura base, tolva, canal de caída y soportes de los componentes. Luego, se realizó el trazado dimensional de las piezas según los planos técnicos, seguido del corte, doblado y perforado de los elementos requeridos. La estructura principal fue ensamblada mediante soldadura TIG, verificando la alineación, perpendicularidad y rigidez del conjunto.

Posteriormente, se realizó el acabado superficial mediante esmerilado y lijado, eliminando rebabas, bordes cortantes e irregularidades generadas durante el corte y la soldadura. También se fabricaron y fijaron los soportes de la cámara, electroválvulas, tolva, canal de conducción y tablero eléctrico. Finalmente, se afectó el montaje general de los componentes mecánicos, verificando su estabilidad, correcta ubicación y facilidad de acceso para operación y mantenimiento

2..5.4 Parte eléctrica

La implementación eléctrica se realizó mediante la instalación de los dispositivos de alimentación, protección y distribución de energía de la máquina. Primero, se identificaron los requerimientos eléctricos del motor, fuente de alimentación, iluminación LED, controlador, cámara, módulos de potencia y electroválvulas. Con esta información se organizó el cableado y se definieron las rutas de conexión dentro de la estructura.

Luego, se efectuó la conexión del sistema monofásico y de los circuitos de corriente continua necesarios para el funcionamiento de los componentes electrónicos. Los conductores fueron fijados y ordenados para evitar interferencias con partes móviles, zonas de vibración o puntos de calor. Antes de energizar el sistema, se verificó la continuidad, polaridad, aislamiento y ajuste de terminales, con la finalidad de asegurar una conexión eléctrica segura y funcional.

2.5.5 Parte de automatización

La automatización se desarrolló mediante la instalación e integración de la cámara, iluminación LED, controlador eléctrico, módulos de potencia y electroválvulas neumáticas, la cámara fue ubicada sobre el canal de caída para captar imágenes de los granos durante su desplazamiento mientras que la iluminación LED permitió mantener condiciones contantes para el procesamiento de imágenes. El controlador recibió señales generadas por el software mediante comunicación serial y activo las electroválvulas según la detección de granos defectuosos.

Finalmente, se realizaron pruebas preliminares de integración para verificar la comunicación entre cámara, software, controlador y electroválvulas. También se comprobó la respuesta de los actuadores, la estabilidad de iluminación y la sincronización entre la detección y expulsión del grano, dejando la maquina fabricada y habilitada para su posterior evaluación del desempeño.

2.6 Evaluación del desempeño de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino respecto al método tradicional.

Para la evaluación del desempeño de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino se realizó mediante la comparación entre el método tradicional de selección manual y el método automatizado. Para ello se utilizó un lote homogéneo de café pergamino, proveniente del caserío San Miguel, distrito Tabaconas Provincia San Ignacio, región Cajamarca. De este lote se extrajeron dos submuestras, las cuales fueron evaluadas de manera independiente para registrar comportamiento del proceso de selección.

2.6.1 Evaluación mediante el método tradicional.

La evaluación del método tradicional se realizó mediante la selección manual de cada submuestra de café pergamino. Esta actividad fue ejecutada por operadores locales, quienes separaron los

granos defectuosos empleando criterios visuales como color, forma, daños físicos y presencia de granos brocados o vanos.

2.6.2 Evaluación mediante la maquina automatizada.

La evaluación del método tradicional se realizó utilizando la máquina seleccionadora de café pergamino previamente fabricada. Antes de iniciar cada prueba, se verifico el funcionamiento del sistema eléctrico, sistema neumático, cámara, iluminación LED y electroválvulas.

Luego, cada submuestra fue ingresada a la tolva de alimentación de la máquina, donde la cámara capto imágenes y el sistema de visión artificial identifico los granos defectuosos. Posteriormente las electroválvulas se activaron para expulsar los granos rechazados mediante el aire comprimido, mientras que los granos aceptables siguen el recorrido hacia la salida correspondiente.

Indicadores evaluados: Para comparar ambos métodos se consideraron tres indicadores principales: tiempo de clasificación, capacidad de procesamiento y rendimiento de calidad. El tiempo fue medido en minutos (min), la maza del café en kilogramos (Kg) y el rendimiento de calidad en porcentaje (%)

Material evaluado: Para la evaluación se utilizó café pergamino seco procedente de un mismo lote con la finalidad de mantener condiciones similares de calidad, humedad y presencia de defectos. Este lote fue dividido en dos submuestras de 15 kg cada una, las cuales fueron pesadas antes de iniciar cada prueba. Esta división permitió realizar registros independientes y comparar el desempeño del método tradicional y método automatizado bajo condiciones similares de evaluación.

Indicadores evaluados:

Procesamiento de datos: Los datos obtenidos en la evaluación manual y automatizado fueron organizados y posteriormente se realizaron tablas comparativas para analizar el tiempo de

clasificación, la capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad de ambos métodos. Finalmente, los resultados fueron comparados por submuestra y de manera general, con la finalidad de determinar la variación del desempeño entre selección manual tradicional y selección automatizada de café pergamino.

2.7 Elaboración manual de operación y plan de mantenimiento de la máquina automatizada.

Para el cumplimiento del cuarto objetivo específico se realizó un manual de operación y el plan de mantenimiento de la maquina automatizada seleccionadora de café pergamino. Para ello se tomó como base el diseño final del equipo, los componentes instalados, la secuencia de funcionamiento y las condiciones de seguridad requeridas para su operación y conservación.

Elaboración del manual de operación: El manual de operación fue elaborado con la finalidad de orientar el uso correcto y seguro de la máquina. Para ello se describieron los principales componentes del equipo, las condiciones previas del funcionamiento y operación del sistema automatizado. Así mismo se incluyeron recomendaciones de seguridad relacionados con la conexión eléctrica, manipulación de tolva, zona de inspección, sistema neumático y partes móviles.

Elaboración del plan de mantenimiento: El plan de mantenimiento fue elaborado con la finalidad de conserva la máquina en condiciones adecuadas de funcionamiento y reducir posibles fallas durante la operación. Para ello se identificaron componentes que requieren limpieza, inspección, ajuste o verificación. Las actividades fueron organizadas según frecuencia de ejecución y en la parte mecánica se consideró limpieza de la tolva, canal de caída y soportes.

III. RESULTADOS

3.1 Desarrollo del diseño

3.1.1 Requerimientos del sistema

Como resultado del diagnóstico del proceso manual, se definieron los requerimientos técnicos del sistema, tomando como referencia la estructura desarrollada por Susanibar (2021), quien propuso una máquina automatizada para la selección de café basada en sistemas de alimentación, conducción y separación de grano.

Tabla 6

Requerimientos del sistema

Requerimiento	Descripción
Capacidad de alimentación	15 kg de café pergamino seco
Tipo de clasificación	Identificación de granos defectuosos mediante visión artificial
Sistema de expulsión	Aire comprimido mediante electroválvulas
Material de la estructura	Acero inoxidable
Sistema de control	Controlador eléctrico y comunicación serial
Alimentación eléctrica	Sistema monofásico

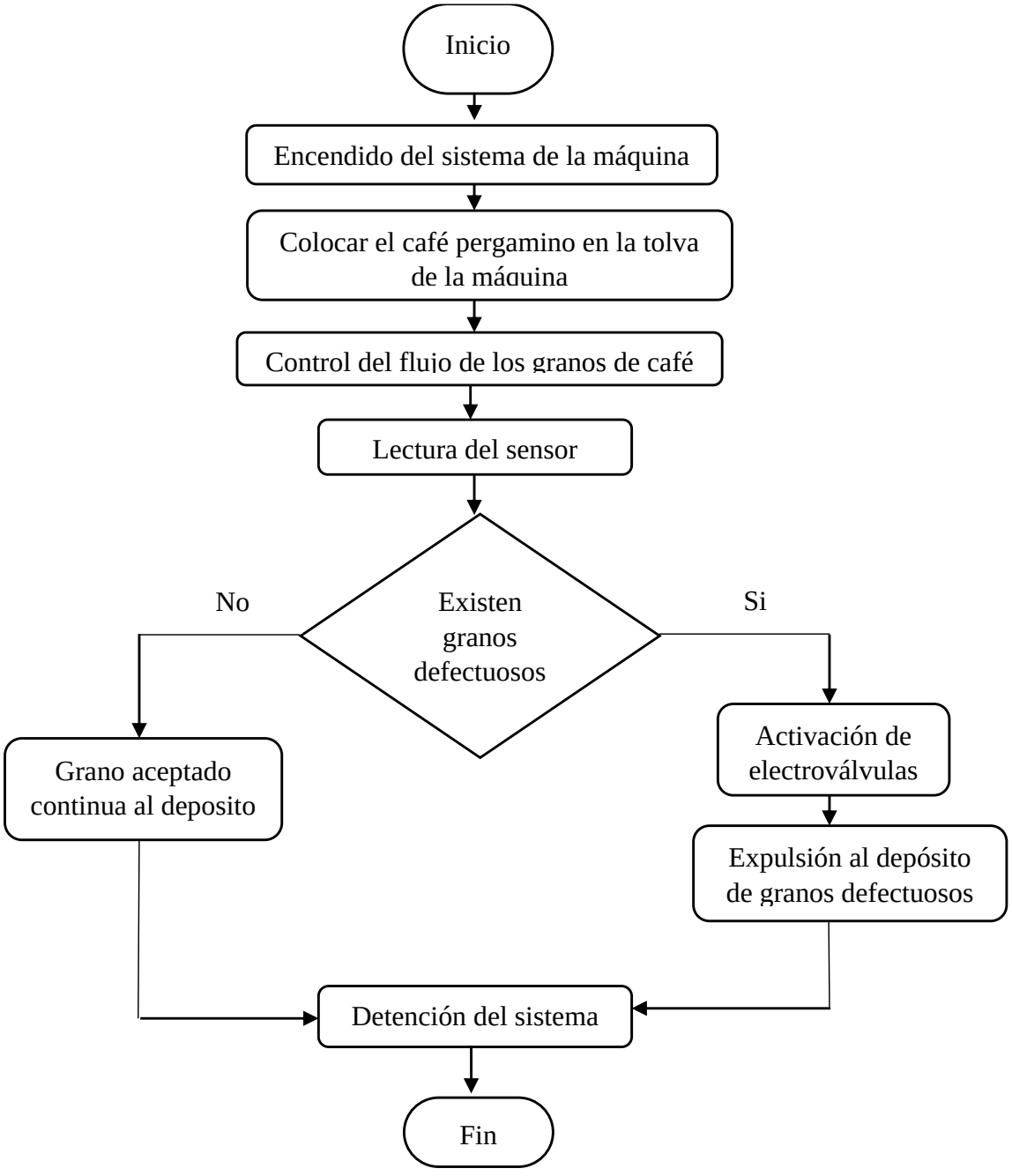
Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Diagrama general del funcionamiento de la máquina

Posteriormente con la finalidad de comprender de manera integral la intervención propuesta en el proceso de selección de café pergamino se presenta en la figura N° 6 un diagrama de flujo, en donde describe específicamente cómo funcionará la máquina automatizada seleccionadora de granos defectuosos en café pergamino.

Figura 6

Diagrama de flujo del funcionamiento de la maquina automatizada



Nota. Explicación de las etapas que se debe tener en cuenta en el mecanismo de la selección de granos de café defectuosos. Fuente: Elaboración propia (2026)

3.1.3 Selección de Materiales

Para la construcción y validación de la máquina, se seleccionaron los siguientes materiales y materiales.

Componentes mecánicos

Láminas de acero inoxidable de 304*1.5*1219*2438: se utilizó para la construcción de la estructura principal de la máquina, tolva, sistema de transporte de los granos, sistema de descarga, lo que permite tener una resistencia y dureza al desgaste del producto.

Especificaciones técnicas

Tabla 7

Especificaciones de la lámina de acero



Propiedad	Especificación
Composición principal	22-24 cromo, 12-15% Níquel
Espesor nominal	1.5 mm
Densidad	8.0 g/cm^3
Resistencia a tracción	585 MPa
Dureza	147 HB
Temperatura Máxima	1038°C

Nota. Adaptado de ASM Material Data Sheet (s.f) y Thyssenkrupp Materiales (2018)

Barra sólida de inoxidable: se utilizó la barra liza de acero tipo AISI 304 de 1/4 plg para la fabricación de ejes y elementos sujetos a cargas dinámicas como son los sistemas de rodamiento.

Tabla 8

Especificaciones técnicas del tubo de acero



Propiedad	Valor
Material	AISI 304
Dimensiones	25.4 × 25.4 × 1.5 mm
Densidad	7.93 g/cm^3
Límite de fluencia	205 MPa
Área transversal	1.43cm^2

Nota. Adaptado de ASM Material Data Sheet (s.f) y Thyssenkrupp Materiales (2018).

Rodamientos: se utilizaron rodamientos de una sola vía con especificaciones de 608 RS, el cual permitirá el desplazamiento de las partes móviles que accionan mediante el sistema motriz.

Soldadura: se utilizó para unir las piezas de acero inoxidable mediante soldadura TIG, utilizando argón como gas protector y electrodo de tungsteno.

Pernos (completos): se utilizaron para realizar el montaje de las partes desmontables.

Materiales eléctricos

Cables de conexión: se emplearon cables de modelo AWG 22 para las conexiones internas del sistema de expulsión de la máquina y para las conexiones eléctricas se utilizó un conductor de NH-90 2.5 MM2.

Pulsador: fue de tipo 12V (ON, OFF) utilizado como interruptor manual de encendido y apagado del sistema de la máquina.

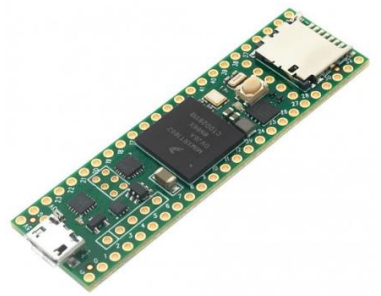
Componentes eléctricos y electrónicos

a). Controladores: Son elementos que reciben señales, procesan información y ordenan la activación de los actuadores.

Teensy 4.1: Actuó como unidad de control principal del sistema, procesando las señales de los sensores y ejecutando decisiones en tiempo real para la detección y expulsión de los granos defectuosos.

Tabla 9

Propiedades del Teensy 4.1



Propiedad	Valor
Microcontrolador	ARM Cortex-M7
Frecuencia	600 MHZ
Memoria RAM	1024 KB (1MB)
Pies analógicos	14
Comunicación	USB, SPI, I2C

Nota: Elaboración propia adaptado a PJRC

b). Sensores: Son los elementos que detectan, capturan o miden información del proceso.

Sensor RGB (captador de imagen): Se utilizo una Cámara de visión artificial Obturador global Alta velocidad USB3.0, este sensor permitirá la captura de imágenes de los granos de café en tiempo real.

Tabla 10

Especificaciones del sensor RGB (Cámara)



Característica	Detalle Técnico
Sensor RGB	Sony IMX183 (1”)
Resolución máxima	5472*3648 (20 Megapíxeles)
Interfaz de Datos	USB 3.0
Velocidad (FPS)	18 a 20 FPS a máxima resolución
Tamaño de pixel	2.4 um* 2.4 um
Memoria interna	Buffer de 128 MB

Nota: Elaboración propia con base en las especificaciones técnicas del componente seleccionado.

Lente industrial: se utilizará un lente de cámara industrial FA de visión de máquina HD de 5MP 16mm 5mp 2/3 pulgadas lente, este complementa el sensor RGB proporcionando un enfoque nítido y estable.

Tabla 11

Especificaciones del lente



Características	Especificación
Distancia focal	16 mm
Resolución	5 megapíxeles (MP)
Formato de sensor	2/3
Distancia mínima de objeto	0.1m – 0.2 m
Distorsión óptica	Menor al 0.1%
Apertura máxima	F1.4

Nota: Adecuado para aplicaciones de inspección visual de alta precisión.

c) Pantalla LCD: fue incorporada en la maquina automatizada seleccionadora de café pergamino como un elemento de visualización del estado operativo del sistema.

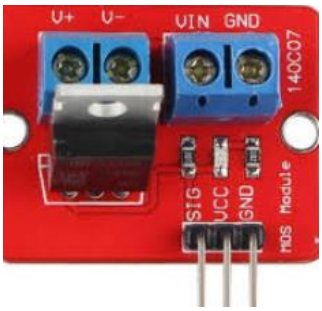
d). Actuadores: Son los elementos que realizan una acción física dentro de la máquina. A continuación, se muestran los siguientes actuadores.

e). Compresor de aire. Suministra el aire comprimido necesario para el sistema neumático.

f). Mosfets D4184: Se utilizó como dispositivo de comunicación electrónica para controlar la activación de las electroválvulas de sistema de expulsión de granos defectuosos. Su función principal fue actuar como una etapa de potencia entre el microcontrolador Teensy 4.1 y las cargas eléctricas, permitiendo que las señales de control de baja corriente generadas por el controlador activan dispositivos de mayor demanda energética.

Tabla 12

Propiedades del Mosfet N



Propiedad	Valor
Tipo	MOSFET N
Resistencia	4-10 mΩ
Conmutación	Alta velocidad
Tensión de drenaje	- 40v
Encapsulado	TO-220

Nota: Elaboración propia con guía de la ficha técnica

Sistema de expulsión (Válvula de alta velocidad MHE2-M1H-3-2G-QS-4-K): es el mecanismo que permitirá expulsar automáticamente los granos defectuosos de los granos buenos tras el análisis realizado por los sensores a través de flujo constante de aire con una determinada calibración.

Tabla 13

Especificaciones de la electroválvula

	Característica	Detalle técnico
	Modelo seleccionado	MHE2-M1H-3-2O-QS-4-K
	Función de válvula	3/2 vías, abierta
	Caudal nominal normal	90 l/min
	Presión de funcionamiento	-0.9 bar a 8 bar
	Tensión de funcionamiento	24v DC
	Ciclo de trabajo	100%
	Tiempo de respuesta	Aprox, 2ms/2ms (velocidad rápida)

Nota. Elaborado con la ficha técnica de Festo (2026)

Motorreductor: sirvió para alimentar el sistema de alimentación y dosificación del café pergamino dentro de la máquina automatizada, permitiendo mover el mecanismo encargado de trasladar los granos de café pergamino al sistema de inspección.

Tabla 14

Características del motor Hp

	Característica	Detalle técnico
	Modelo seleccionado	Motor DC
	Potencia nominal	40 w
	Potencia equivalente	0.054 HP
	Voltaje nominal	24v DC
	Velocidad de salida	1000-1500 rpm
	Tiempo de respuesta	(velocidad rápida)

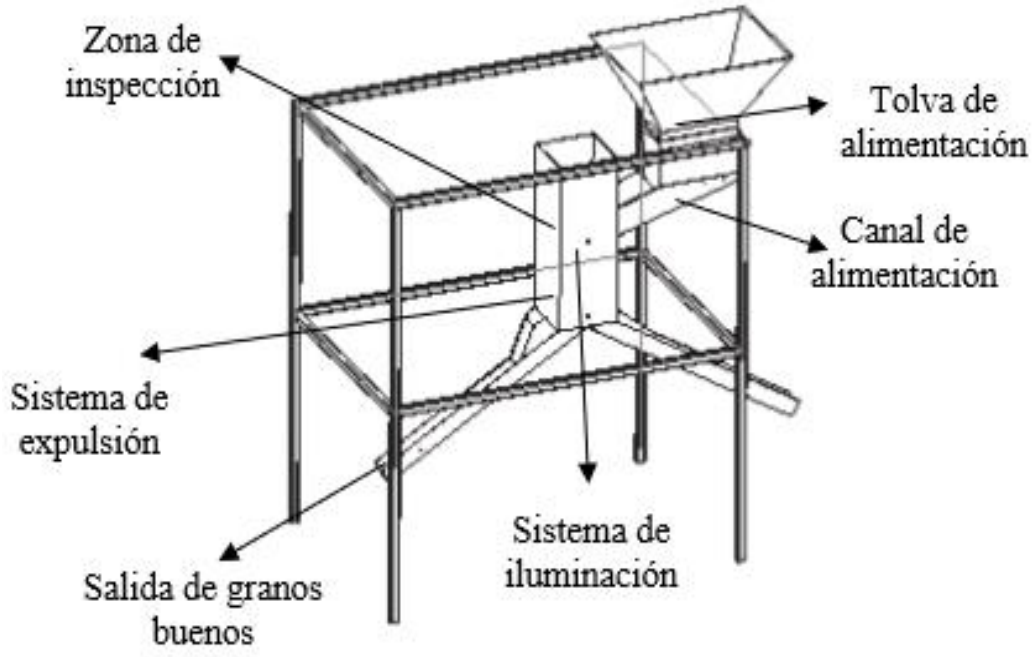
Nota: Elaboración propia con guía de la ficha técnica.

3.1.4 Diseño de la máquina automatizada

La máquina automatizada seleccionadora de café pergamino fue diseñada integrando componentes mecánicos, eléctricos, neumáticos y de visión artificial.

Figura 7

Diseño de máquina automatizada general



Nota: En la figura se observa las partes de la máquina automatizada. Fuente: Elaboración propia (2026)

3.1.4.1 Planos mecánicos

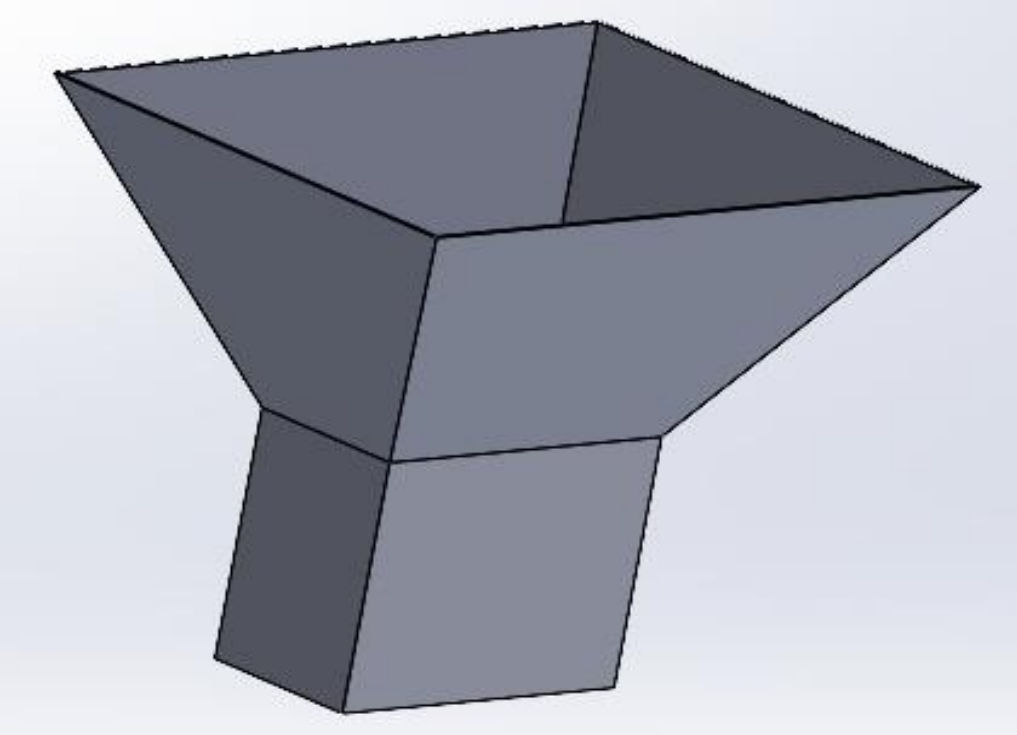
a). Diseño de la tolva

La tolva de alimentación fue diseñada para 40 m^3 equivalente a 40 litros, con una base inferior de 200 mm * 100mm, una boca superior de 650 mm*550 y una altura de 400 mm. Con la finalidad de almacenar y suministrar de manera continua los granos de café pergamino hacia el sistema de transporte. Su estructura tiene forma de una pirámide truncada debido su eficiencia en

la descarga de materiales granulares por gravedad y su facilidad de fabricación utilizando láminas de acero inoxidable. Para especificación de medidas ver el **(Anexo 8)**

Figura 8

Diseño de tolva



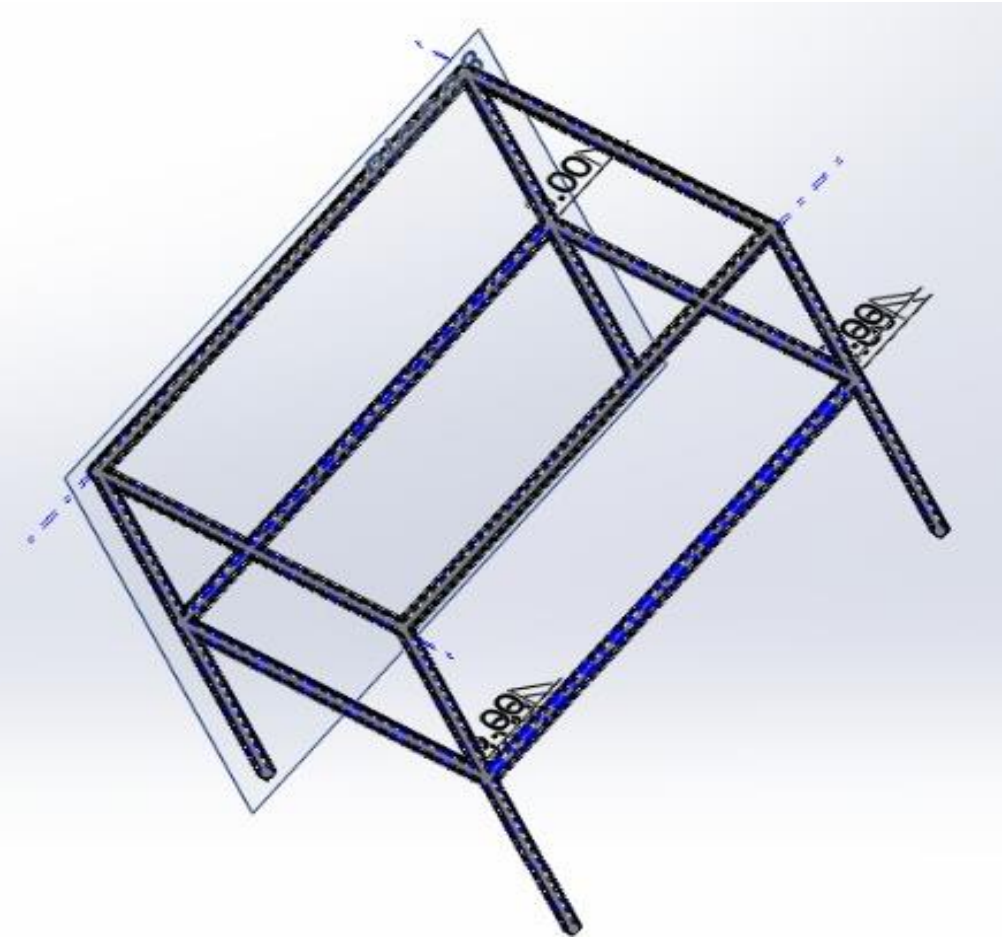
Fuente: elaboración propia (2026).

b). Diseño de la estructura de soporte

La estructura fue diseñada con tuvo cuadrado de acero inoxidable con las siguientes medidas: una anchura de 600 mm * 900 mm y una altura de 1200 mm con la finalidad de soportar cada una de las piezas de la máquina automática seleccionadora de café pergamino, tales como la tolva, sistema de transporte, sistemas de inspección y para los sistemas de expulsión.

Figura 9

Diseño de estructura de soporte



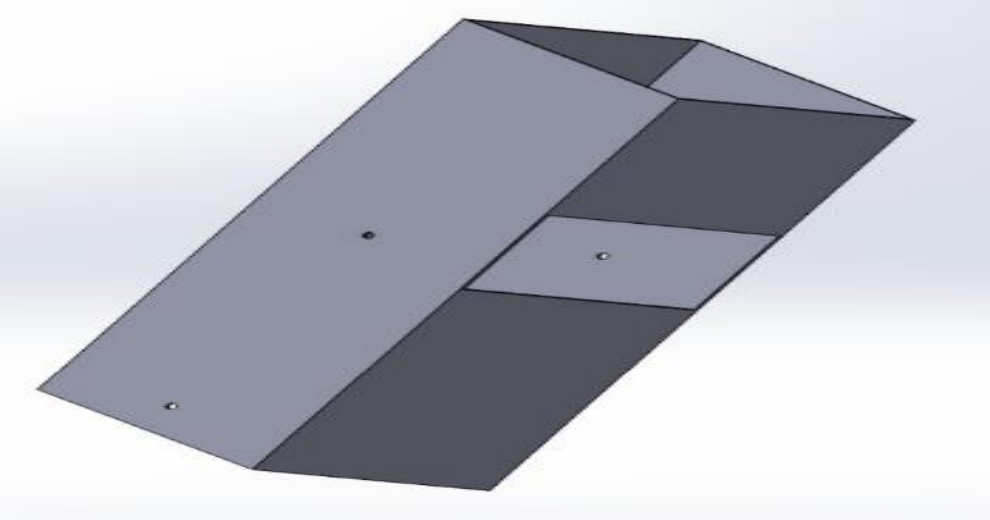
Fuente: elaboración propia (2026).

C). Diseño para el soporte del sistema de automatización

El soporte del sistema de automatización se diseñó de 150 * 150 mm y 400 mm de altura para proteger los componentes electrónicos tales como la cámara y los dispositivos de potencia.

Figura 10

Diseño para el soporte del sistema de automatización



Fuente: elaboración propia (2026).

d). Sistema de descarga

El sistema de descarga fue diseñado con dos salidas independientes, cada una con una medida de 150 mm* 500 mm y una altura de 40 mm. Esta configuración permitió conducir el café pergamino de manera ordenada desde la selección hacia el empaquetado. **(ver anexos N° 8)**

e). Diseño final de la máquina

Para llegar al diseño final de la máquina seleccionadora de café pergamino se presentan diferentes dificultades mecánicas debido a factores que no se tomaron en cuenta, pero se logró solucionar de la mejor manera, por ello se realizó el diseño de la maquina sin que afecte el funcionamiento y el objetivo establecido en el proyecto de investigación. **(ver anexos N° 8)**

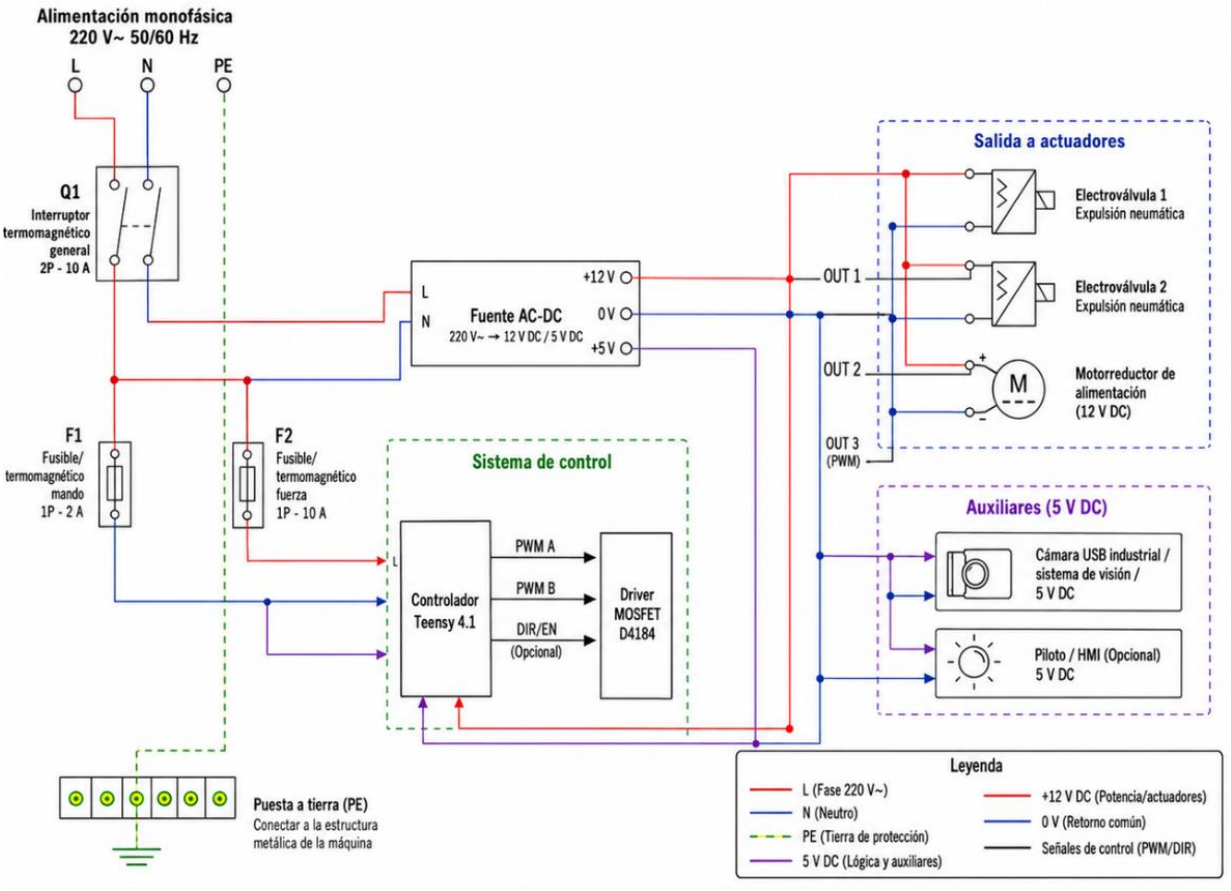
3.1.4.2 Diseño eléctrico de la máquina

El diseño eléctrico de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino se representó mediante un plano general de alimentación y distribución eléctrico: en este plano se integró la alimentación monofásica, de 220 V, interruptor general, elementos de protección, puesta a tierra,

fuente AC – DC, controlador Teensy, iluminación LED, cámara, driver MOSFET y las electroválvulas.

Figura 11

Diagrama general eléctrico



Nota: En la figura se observa los diagramas eléctricos de la máquina automatizada. Fuente: Elaboración propia (2026)

3.1.4.3 Diseño del sistema de automatización: se desarrolló con la integración de la cámara, software de visión artificial, controlador Teensy, driver MOSFET D4184 y electroválvulas neumáticas**. (ver anexo N° 09)**

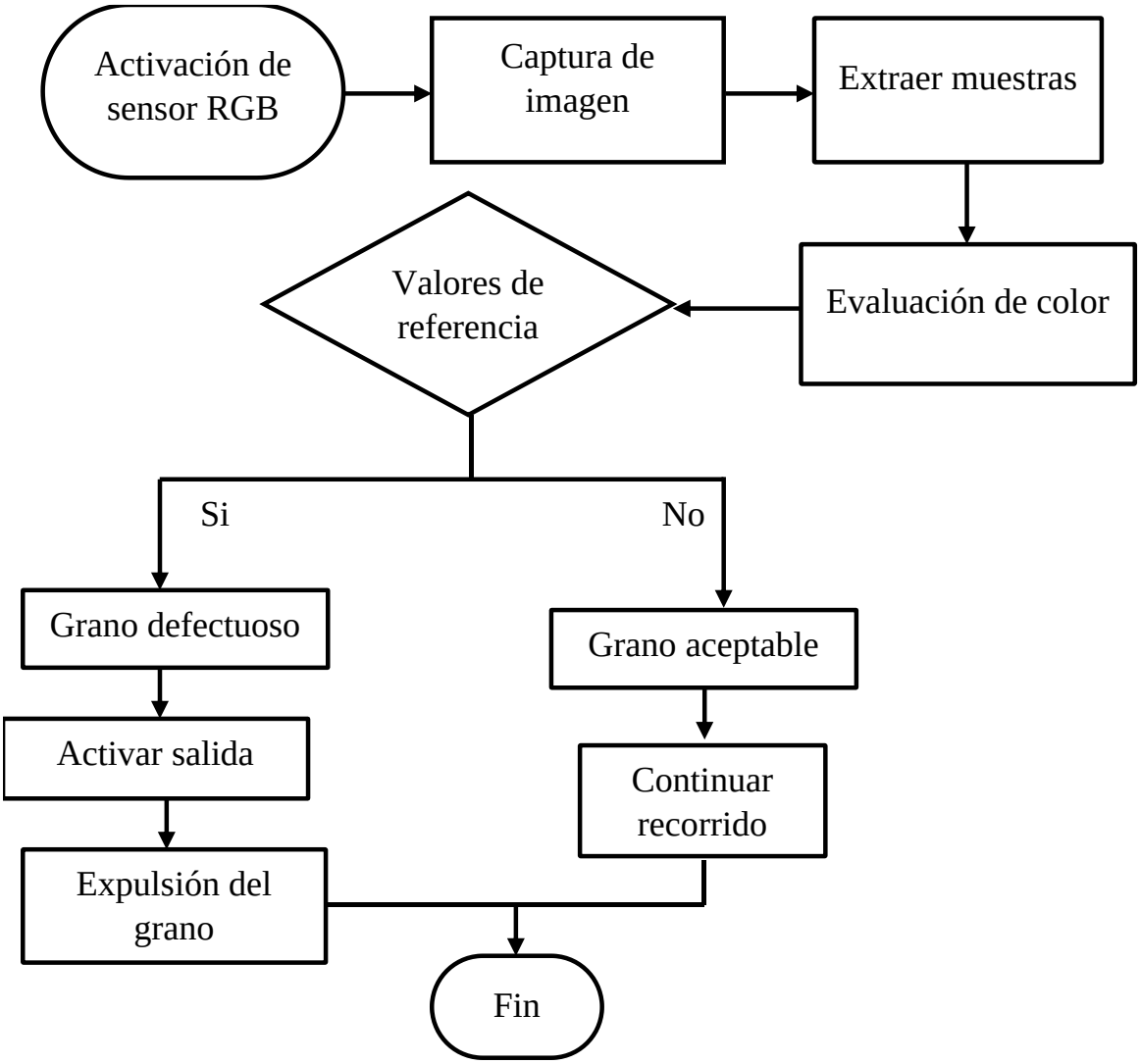
3.2 Desarrollo del sistema de Visión artificial.

El sistema de visión artificial se desarrolló bajo con la finalidad de identificar granos defectuosos de café pergamino durante su desplazamiento por la zona de inspección de la máquina seleccionadora. El procedimiento general se presenta en la figura 10, donde muestra las etapas de adquisición de imagen, detección de grano, clasificación por color y envió de señales de control hacia el sistema de expulsión.

El procesamiento de imágenes se realizó en la unidad de cómputo externa mediante programación en Python y librería OpenCV, debido a que esta etapa requiere la captura y análisis de fotos. El microcontrolador Teensy 4.1 fue utilizado como unidad de accionamiento, encargado de recibir los comandos generados por el algoritmo y activar las electroválvulas mediante el MOSFET.

Figura 12

Diagrama de Flujo Adquisición y Procesamiento de Imagen



Fuente: elaboración propia (2026).

Adquisición de la imagen

Para la captura de imagen se utilizó una cámara USB industrial instalada sobre la zona de inspección del canal de desplazamiento del café pergamino, y un sistema de iluminación LED constante, permitiendo la captura de imágenes de los granos en movimiento de manera constante. El procesamiento de las imágenes se realizó en la unidad de cómputo mediante algoritmo de visión

artificial. Esta etapa fue de manera importante porque la calidad de imagen influyo directamente en la segmentación del fondo, la detección de grano y precisión de clasificación por color.

Figura 13

Captura de imagen del grano de café



Fuente: elaboración propia (2026).

Clasificación por color

La clasificación por color se realizó mediante el análisis de las características visuales del grano en espacio de color HSV. Para la máquina se consideraron dos categorías principales de rechazo tales como el coco y grano brocoso.

El grano coco fue identificado por presentar tonalidades amarillentas y pálidas, mientras que el grano brocoso fue reconocido por la presencia de manchas oscuras, zonas negras o alteraciones visibles en la superficie. Cuando el grano bueno no presento características asociadas

a los defectos mencionados, fue clasificado como grano bueno y continuo su recorrido por el canal principal sin activar el sistema de expulsión.

Figura 14

Clasificación por color

```
# ================================================
# ACTIVACIÓN DE ELECTROVÁLVULAS
# ================================================
# Cuando el grano llega a la línea de disparo,
# se envía el comando correspondiente al Teensy.

if not data["disparado"] and cy >= Y_DISPARO_PIX:

    if tipo == "COCO":
        enviar_comando(teensy, COMANDO_COCO)
        data["disparado"] = True
        print("Disparo: COCO")

    elif tipo == "BROCOSO":
        enviar_comando(teensy, COMANDO_BROCOSO)
        data["disparado"] = True
        print("Disparo: BROCOSO")

    else:
        data["disparado"] = True
        print("Grano bueno: sin disparo")

nuevos_granos[id_asig] = data

# ================================================
```

Fuente: elaboración propia (2026).

Comunicación y accionamiento del sistema de expulsión

Una vez ya realizada la clasificación, el algoritmo envió un comando serial hacia el microcontrolador Tenensy 4.1. Para el grano coco se asignó el comando “C” mientras que para el grano brocoso se asignó el comando “B”.

El Teensy 4.1 recibió dichos comandos y activo las salidas digitales conectadas a los módulos MOSFET, los cuales permitieron accionar las electroválvulas neumáticas. La primera electroválvula se destinó a la expulsión de granos coco y la segunda a la expulsión de granos

brocosos, por otra parte, los granos buenos no generaron señal de activación y continuaran su recorrido.

3.3 Fabricación y montaje de la máquina

3.3.1 Parte mecánica

a). Estructura base de la máquina

Se manufacturó la estructura base con tubo de acero inoxidable de 25.4*25.4*1.5 mm y las uniones fueron realizadas con soldadura TIG, lo que permitió obtener juntas limpias y resistentes. Posteriormente se realizó el pulido de las juntas soldadas con la finalidad de mejorar el acabado superficial, eliminar irregularidades y reducir puntos de residuos durante la operación de la máquina.

Figura 15

Estructura de la máquina



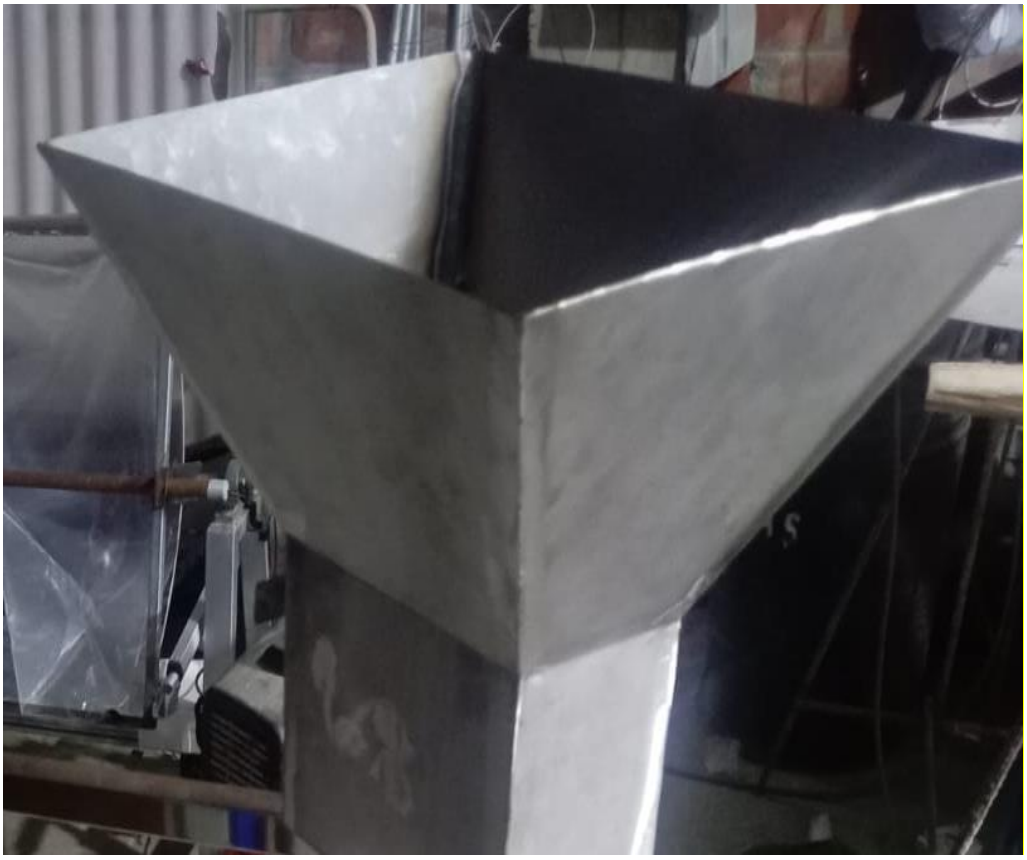
Fuente: Elaboración propia (2026)

b). Tolva superior de alimentación

La pieza fue fabricada utilizando como materia prima una lámina de acero inoxidable AISI 304 de calibre 1.5 mm, la cual fue doblegada en una prensa hidráulica y unida con soldadura TIG, quedando en forma de un trapecio. La elección del material se realizó en base a las normativas vigentes en diseños técnicos destinados a fabricación de maquinaria destinada al sector de industria alimentaria. Según el Instituto Nacional de Tecnología Industrial, (2023) el acero inoxidable es ampliamente utilizado en la fabricación de equipos destinados al procesamiento de alimentos debido a su alta resistencia a la corrosión, durabilidad y facilidad de limpieza.

Figura 16

Fabricación de la tolva



Fuente: Elaboración propia (2026)

c). Sistema de distribución en forma uniforme de los granos

La estructura fue realizada a partir de retazos de plancha de acero inoxidable AISI 304 de calibre (1.5 mm), las cuales fueron adaptadas de acuerdo a los requerimientos del diseño de la máquina.

Figura 17

Canal de distribución de grano



Fuente: Elaboración propia (2026)

d). Caja de acople para la cámara y válvulas

El sistema de expulsión de granos se fabricó con una plancha de acero inoxidable AISI 304, esta fue doblegada y unida con soldadura TIG.

Figura 18

Caja de acople para la cámara y válvulas



Fuente: Elaboración propia (2026)

e) Ensamble de cámara

El ensamblaje de la cámara RGB se realizó sobre una plancha de acero inoxidable, la cual sirvió como soporte estructural para la fijación de la cámara, permitiendo mantener una posición estable para la captura de las imágenes.

f). Ensamble de electroválvula

El ensamblaje de las 2 electroválvulas se realizó sobre retazos de planchas de acero inoxidable, los cuales fueron utilizados como soporte estructural para la fijación de las electroválvulas, permitiendo una expulsión controlada de los granos de acuerdo al tipo detectado por el sistema de la máquina automatizada.

g). Ensamble final de la máquina automatizada

El ensamblaje final de la máquina automatizada se realizó uniendo cada una de las piezas mecánicas, estructurales y electrónicos previamente fabricados y acondicionados. Durante este proceso se realizó la instalación de la tolva de alimentación, el sistema para la distribución

uniforme de los granos, fijación de la cámara RGB encargada de la captura de imágenes, fijación de las electroválvulas para la expulsión de los granos defectuosos, fijación de las caídas de todos los tipos de granos seleccionados.

Figura 19

Máquina final



Fuente: Elaboración propia (2026)

3.4 Evaluación del desempeño de la máquina respecto al método tradicional

Después de haber culminado la fabricación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino, se realizaron ensayos controlados para comprobar el desempeño con el método tradicional de selección manual. Para ello se utilizó una muestra homogénea de 15 kg de café pergamino para cada prueba, provenientes del mismo lote y con un rendimiento inicial de calidad del 72%. La evaluación considero indicadores como el tiempo de clasificación, la capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad del café.

3.4.1 Resultados de campo del método tradicional

Durante la recolección de datos en el Caserío San Miguel, se evaluó el desempeño del método tradicional de selección de granos defectuosos en café pergamino. Esta evaluación permitió establecer una línea base del proceso manual considerando el avance de jornada laboral como el comportamiento el comportamiento del proceso en una muestra controlada de 15 kg.

Avance por jornada laboral diaria (8 horas)

Tabla 15

Jornada diaria de selección manual de café pergamino

Jornalero	Cantidad de café pergamino seleccionado en kg	Rendimiento de calidad inicial %	Tiempo Horas/ minutos	Rendimiento de calidad final %
1	98	72%	8 h	78%
2	98	72%	8 h	78%

Nota: Los resultados muestran que, bajo condiciones reales de trabajo un jornalero logra procesar aproximadamente 98 kg por día, alcanzando un rendimiento de calidad final del 78%.

3.4.2 Resultados del método tradicional con una muestra de 15 kg de café pergamino.

Con la finalidad de establecer una línea base comparable con el desempeño de la máquina automatizada, se evaluó el proceso de selección manual utilizando dos muestras homogéneas de 15 kg de café pergamino diferentes para cada agricultor. Las actividades fueron realizadas por dos jornaleros bajo las mismas condiciones de trabajo, registrándose el tiempo empleado y el rendimiento de calidad antes y después de la selección.

Tabla 16

Jornaleros para 15 kilos

Jornalero	Cantidad de café pergamino seleccionado en kg	Rendimiento de calidad inicial %	Tiempos minutos	Rendimiento de calidad final %
Jornalero A	15 kg	72%	62 min	78%
Jornalero B	15 kg	72%	67 min	78%
Promedio	15 kg	72%	64.5 min	78%

Nota: Elaboración propia

Tiempo promedio de selección manual para 15 kg de café pergamino.

Agricultor 1: 1h 02 min (62 min)

Agricultor 2: 1h 07 min (67 min)

Entonces el tiempo promedio que utilizan los agricultores es de 64.5 minutos.

Se calculó la capacidad diaria si la persona mantuviera el ritmo

$$Capacidad\ diaria\ = \left(\frac{15\ kg}{64.5\ min}\right) * 480 = 111.63\ kg/día$$

Se determinó la disminución del jornalero diario

$$Disminución\ diaria\ = \left(\frac{111.63 - 98}{111.63}\right) * 100 = 12.21\%$$

Evidencia una disminución en la eficiencia de selección de granos defectuosos debido a la fatiga física, estrés visual, variabilidad del desempeño humano.

3.4.3 Resultados de la máquina automatizada

Para la evaluación del desempeño de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino, se realizaron dos pruebas experimentales utilizando dos lotes diferentes de café pergamino. De cada lote se tomó una muestra homogénea de 15 kg, con la finalidad de evaluar el comportamiento de la máquina bajo condiciones reales de variación del producto. En total, se evaluaron 30 kg de café pergamino, considerando como indicadores el tiempo de clasificación, la capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad final.

Tabla 17

Prueba de selección con máquina automatizada

Máquina automatizada	Cantidad de café pergamino seleccionado en kg	Rendimiento inicial %	Tiempos horas/minutos	Rendimiento final %
Prueba 1	15 kg	72%	17 min	85 %
Prueba 2	15 kg	72%	15 min	85 %
Promedio	15 kg	72%	16 min	85 %

Capacidad de procesamiento de la máquina

$$Q = \frac{15}{16} = 0.94 \text{ Kg/min}$$

Capacidad diaria

$$\text{Capacidad diaria} = 480\text{min} * 0.94\text{Kg/min} = 450\text{kg/dia}$$

3.4.4 Comparación entre método manual y método automatizado

La comparación entre ambos métodos se realizó considerando una muestra de 15 kg de café pergamino, el tiempo de clasificación, la capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad.

Tabla 18

Comparación método manual y método automatizado

Parámetro	**Método manual**	**Máquina automatizada**
Cantidad evaluada	15 kg	15 kg
Tiempo	64.5 min	16 min
Capacidad (Kg/min)	0.232	0.94
Capacidad diaria referencial (Kg/día)	98 kg	450 kg
Rendimiento inicial	72 %	72 %
Rendimiento final	78 %	85 %

Nota: La tabla muestra las diferencias que existen entre el método manual y el método automatizado en función del tiempo, capacidad de procesamiento y el rendimiento de calidad. Elaboración propia (2026)

La comparación muestra que la maquina automatizada redujo el tiempo de selección de 64.5 minutos a 16 minutos para una muestra de 15 kg. Esta diferencia representa una reducción de tiempo de procesamiento de:

$$Reduccion\ de\ tiempo = \frac{64.5-16}{64.5} = 75.19\%$$

Relación de mejora

$$Relación\ de\ mejora = \frac{0.94}{0.232} = 4.05$$

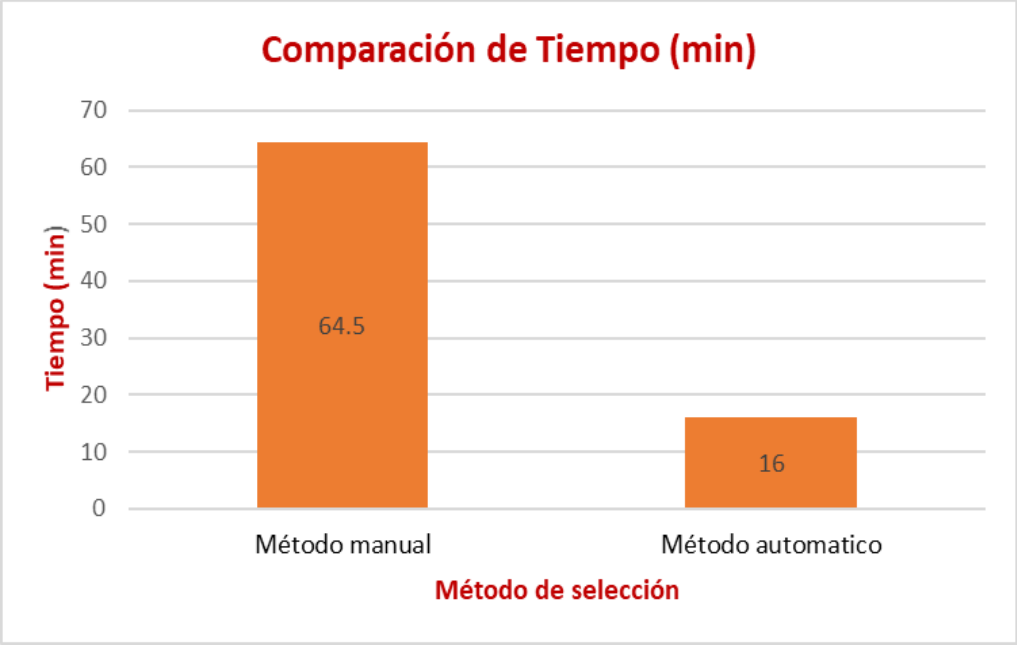
Entonces en cuanto a lo que es el rendimiento de calidad, el método manual incrementó de 72 al 78 %, equivalente a una mejora del 6%. En cambio, con una muestra experimental realizada en la máquina automatizada el rendimiento incremento de 72 % al 85 %, equivalente a una mejora del 13 %. en consecuencia, la máquina alcanzó un rendimiento final superior a 7 % respecto al método tradicional.

3.4.5 Comparación gráfica de los resultados

A partir de los resultados presentados en la tabla N° 18, se elaboraron gráficos comparativos para representar visualmente las diferencias entre método manual y la máquina automatizada, considerando tiempo de clasificación, capacidad de procesamiento y rendimiento de calidad del café pergamino.

Figura 20

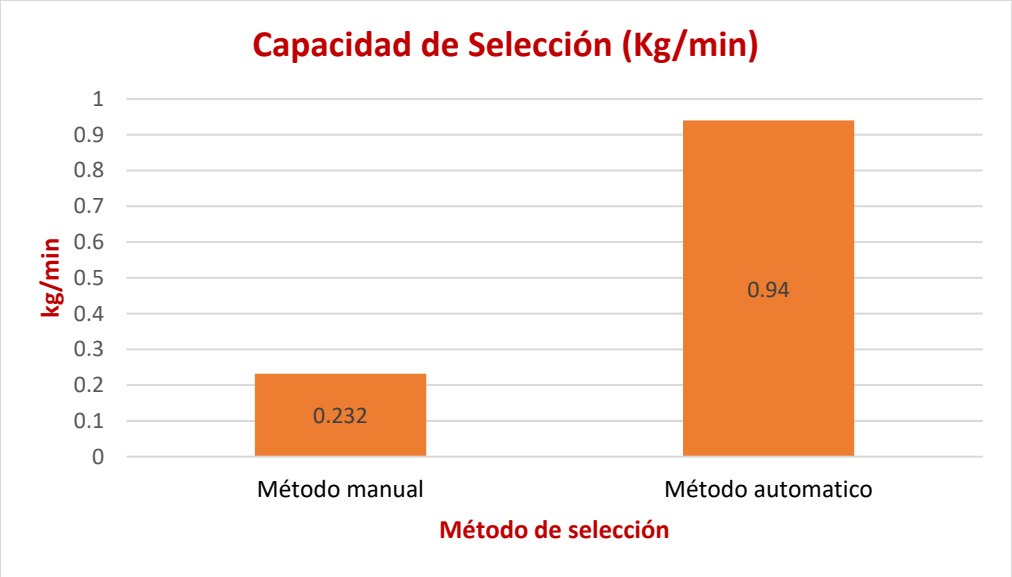
Comparación del tiempo de clasificación entre el método manual y automatizado



Nota: La figura muestra la reducción del tiempo de clasificación de 64.5 minutos mediante el método manual a 16 minutos mediante la máquina automatizada. Elaboración propia (2026).

Figura 21

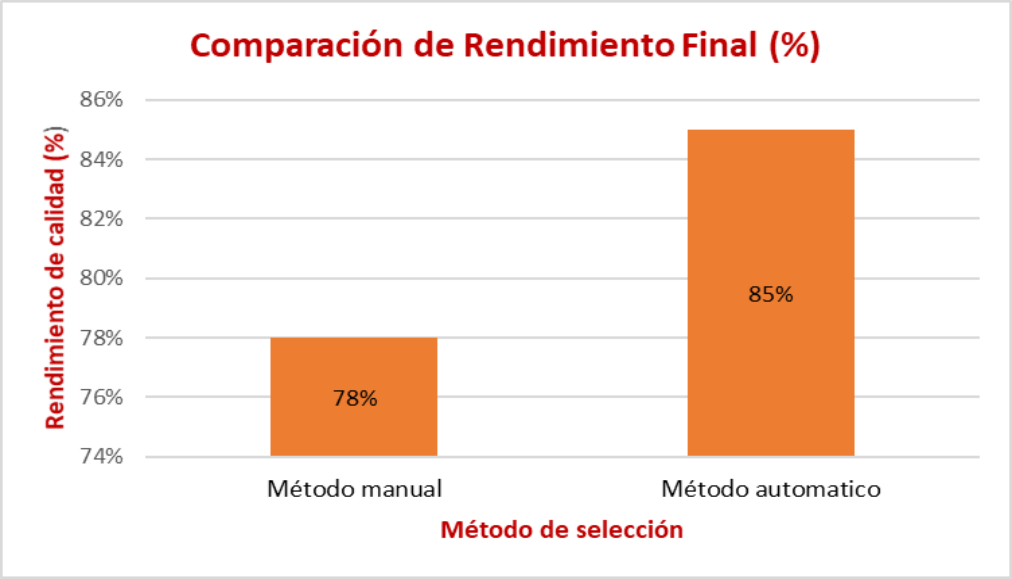
Comparación de la capacidad de procesamiento entre el método manual y automatizado



Nota. La figura muestra la capacidad de procesamiento del método manual y del método automatizado, expresada en kg/min. Elaboración propia (2026).

Figura 22

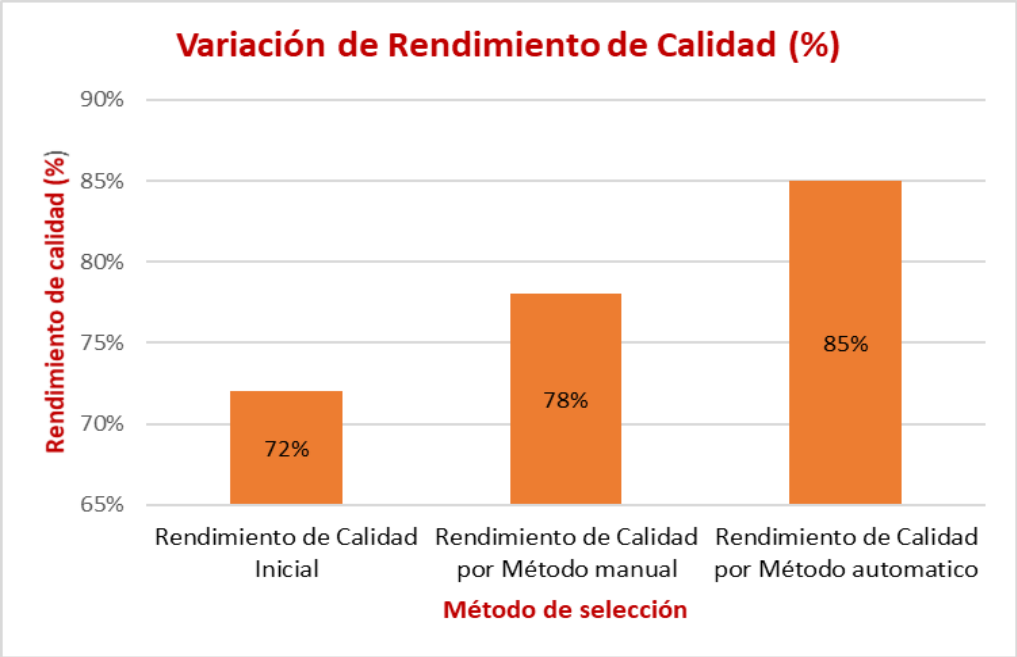
Comparación del rendimiento final del café pergamino



Nota. La figura muestra el rendimiento final de calidad alcanzado mediante el método manual y la máquina automatizada. Elaboración propia (2026).

Figura 23

Mejora del rendimiento de calidad del café pergamino



Nota: La figura muestra la variación del rendimiento de calidad del café pergamino desde el valor inicial hasta los resultados obtenidos mediante selección manual y selección automatizada. Elaboración propia (2026).

3.5 Evaluación económica

Costo de operación manual

$$Costo\ de\ operación\ = Costo\ hora * Tiempo\ de\ operación$$

$$Costo\ de\ Operación\ = 6.25 * 8$$

$$Costo\ de\ Operación\ = S/\ 50$$

Por lo tanto, el costo diario es de S/ 50 por jornada de trabajo de 8 horas.

Costo de operación de la máquina

Para obtener el costo de operación de la máquina tomaremos en cuenta el consumo de energía eléctrica por día, el cual es de S/5.60 más la mano de obrero que es S/ 50 día, entonces el costo de operación de la máquina automatizada es de S/ 55.60.

Comparación económica

Tabla 19

Comparación económica

Método	Dia	Mes
Manual	S/ 50	S/ 1400
Maquina	S/ 55.60	S/ 1556.8

Análisis de costo económico por unidad de producción.

Debido a la diferencia de productividad que presentan ambos métodos, se determinó el costo por kilogramo procesado.

Método manual

$$Costo\ por\ kg = \frac{Costo\ diario}{Produccion\ diaria}$$

$$Costo\ por\ kg = \frac{50}{98} = 0.51\ S/Kg$$

Máquina automatizada

$$Costo\ por\ kg = \frac{Costo\ diario}{Produccion\ diaria}$$

$$Costo\ por\ kg = \frac{50}{450} = 0.12\ S/Kg$$

Tabla 20

Comparación de costo por kilogramo

Método	Producción (Kg/día)	Costo diario (S/)	Costo por Kg (S/)
Manual	98	50	0.51
Automático	450	55.60	0.12

Análisis económico

Los resultaos evidenciaron que la maquina automatizada presenta un costo mayor en operar respecto al método tradicional, pero su mayor capacidad en producción reduce significativamente el costo por unidad de producción.

- ✓ El método mana tiene un costo de S/ 0.51 por Kg.
- ✓ La máquina automatizada tiene un costo mensual de S/ 0.12 por Kg.

Entonces el costo de la máquina automática presento una reducción aproximada del:

$$eficiencia\ de\ la\ máquina = \frac{Costo\ por\ kg\ manual - Costo\ por\ kg\ automatico}{Costo\ por\ kg\ manual} * 100$$

$$Costo\ por\ kg = \frac{0.51 - 0.12}{0.51} * 100 = S/\ 76.44$$

Entonces se demuestra que el sistema automatizado es más económico, más eficiente y más viable, incluso considerando la necesidad de un operario para su funcionamiento.

Manual de operación y mantenimiento para la máquina automática seleccionadora de granos de café pergamino-

3.6 Manual de operación de la máquina

El manual de operación permite que el aperador se informe correctamente sobre el funcionamiento del equipo y tenga debidas precauciones al momento de estar funcionando la máquina. A continuación, se indica el manual de operación.

Tabla 21

Características de la máquina automatizada

Características generales		
	Parte mecánica	**Parte eléctrica**
	- Estructura de acero inoxidable - Ancho 600 mm - Largo 900 mm - Altura 1200 mm	- Motor 40 w - Voltaje 12 a 24 v - Compresor 120 L - Sistema de expulsión automática - Electroválvulas 3/2 vías abiertas

Nota: Elaboración propia (2026).

3.6.1 Instrucciones de funcionamiento

Antes de iniciar el funcionamiento de la máquina verificar las siguientes condiciones:

- Verificar que la máquina automatizada se encuentre en una superficie plana.

- Verificar que la tolva este limpia y libre de residuos.
- Confirmar que no existan obstrucciones en el canal de transporte.
- Conectar la máquina al toma corriente
- Conectar el compresor
- Encender la máquina
- Encender el compresor
- Ubicar el café pergamino en la tolva
- Esperar que se realice el proceso
- Finalizar el proceso de selección

3.6.2 Parámetros operativos

Tabla 22

Parámetros Operativos

Parámetro	Valor recomendado
Capacidad de alimentación	15-20 kg
Presión neumática	5-7 bar
Velocidad del sistema	Ajustable
Iluminación del sistema	Constante
Temperatura de operación	Ambiente

Fuente: Elaboración Propia (2026)

3.6.3 Manual de mantenimiento de la máquina

Tabla 23

Manual de Mantenimiento

Sistema	Componente	Actividad de mantenimiento	Frecuencia
- **Sistema mecánico**	- Tolva de alimentación	- Limpieza de residuos	- Diario
- **Sistema mecánico**	- Canal de transporte de granos	- Limpieza y verificación de obstrucciones	- Diario
- **Sistema mecánico**	- Estructura metálica	- Verificación de pernos	- Diario
- **Sistema mecánico**	- Ejes y rodamientos	- Lubricación	- Semanal
- **Sistema eléctrico**	- Cableado eléctrico	- Inspección de conexiones	- Mensual
- **Sistema neumático**	- Electroválvulas	- Limpieza	- Semanal
- **Sistema de visión**	- Cámara	- Ajuste y verificación	- Mensual
- **Sistema general**	- Máquina completa	- Inspección general del sistema	- Mensual
- **Sistema general**	- Máquina completa	- Revisión técnica	- Semestral

Fuente: Elaboración Propia (2026)

IV. DISCUSIÓN

La presente investigación tuvo como finalidad fabricar una máquina automatizada seleccionadora de granos defectuosos de café pergamino para incrementar el rendimiento de calidad del producto en el Caserío San Miguel, Tamborapa Pueblo–San Ignacio. El diseño técnico de la máquina se desarrolló a partir del diagnóstico del proceso tradicional de selección manual, lo que permitió establecer los requerimientos funcionales e integrar los sistemas de alimentación, conducción, inspección mediante visión artificial, control y expulsión neumática. Estos resultados guardan relación con Susanibar (2021), quien señala que una máquina clasificadora debe estar conformada por sistemas de alimentación, conducción y separación del grano para optimizar el proceso de clasificación. Sin embargo, la presente investigación incorporó adicionalmente un sistema de visión artificial desarrollado en Python con OpenCV, cámara RGB y controlador Teensy 4.1, permitiendo automatizar la detección y separación de granos defectuosos de acuerdo con las condiciones de producción del Caserío San Miguel.

Respecto a la fabricación, la integración de los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y neumáticos permitió obtener una máquina funcional capaz de ejecutar automáticamente la clasificación del café pergamino. La estructura de acero inoxidable, el sistema de alimentación, el canal de conducción, la cámara RGB, las electroválvulas neumáticas y el sistema de control trabajaron de manera sincronizada durante las pruebas experimentales. Estos resultados coinciden con los estudios de León et al. (2024), quienes concluyen que la integración entre visión artificial y automatización mejora la precisión de clasificación al disminuir la intervención del operador y aumentar la uniformidad del proceso.

En la evaluación del desempeño se comprobó que la máquina automatizada superó al método tradicional de selección manual. Mientras el proceso manual requirió un promedio de 64,5 minutos para clasificar 15 kg de café pergamino, la máquina realizó el mismo proceso en 16 minutos, reduciendo el tiempo de clasificación en aproximadamente 75 %. Asimismo, la capacidad de

procesamiento aumentó de 0,232 kg/min a 0,94 kg/min, mientras que la capacidad diaria pasó de 98 kg/día a 450 kg/día. En cuanto al rendimiento de calidad, el método manual incrementó el rendimiento del 72 % al 78 %, mientras que la máquina automatizada alcanzó un rendimiento del 85 %, evidenciando una mejora de 13 puntos porcentuales respecto al valor inicial y 7 puntos porcentuales por encima del método tradicional. Estos resultados demuestran que la incorporación de visión artificial y automatización mejora significativamente la eficiencia del proceso de selección y reduce la variabilidad propia de la clasificación manual.

Los resultados obtenidos presentan concordancia con las investigaciones desarrolladas por Gomes y Luna (2023), quienes reportaron incrementos importantes en la capacidad de procesamiento mediante sistemas automatizados, así como con León et al. (2024), quienes demostraron que la visión artificial incrementa la precisión en la clasificación de granos de café pergamino. Aunque el rendimiento de calidad alcanzado en la presente investigación (85 %) fue inferior al reportado por dichos autores (92 %–93 %), esta diferencia puede atribuirse a las condiciones de iluminación empleadas durante las pruebas, a la variabilidad de las características físicas y cromáticas del café pergamino evaluado y al algoritmo de clasificación implementado. No obstante, los resultados obtenidos validan el funcionamiento de la máquina desarrollada y evidencian que futuras optimizaciones del algoritmo de visión artificial, del sistema de iluminación y del entrenamiento del modelo permitirán incrementar aún más la precisión y el rendimiento del proceso de clasificación.

Finalmente, la elaboración del manual de operación y del plan de mantenimiento preventivo constituye un complemento técnico de la investigación, ya que proporciona procedimientos estandarizados para la operación segura de la máquina, la inspección periódica de sus componentes y la ejecución de actividades de mantenimiento preventivo. Esto contribuye a reducir la probabilidad de fallas, garantizar la continuidad operativa del sistema y prolongar la vida útil de los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y neumáticos.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El desarrolló del diseño técnico de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino, fue realizado tomando como base la información obtenida durante las visitas técnicas realizadas en el Caserío San Miguel. Dicho diseño permitió integrar los sistemas mecánico, electrónicos, neumático y de visión artificial, definiendo los componentes y parámetros necesarios para realizar la clasificación automática de granos defectuosos.

Se fabricó e implementó una máquina automatizada funcional para la selección de granos defectuosos de café pergamino, mediante la integración de una estructura mecánica de acero inoxidable, sistema de transporte, cámara RGB, controlador Teensy 4.1, iluminación LED y mecanismo neumático de expulsión y se realizó pruebas operativas para verificar el funcionamiento adecuado de los sistemas que conforman la máquina automatizada.

La evaluación comparativa permitió evidenciar que la máquina automatizada presentó un mejor desempeño que el método tradicional en los indicadores analizados y el tiempo de clasificación disminuyó de 64.5 a 16 minutos para una muestra de 15 kg; la capacidad de procesamiento aumentó de 0.232 kg/min a 0.94 kg/min; y la capacidad diaria referencial pasó de 98 kg/día a 450 kg/día tal como se muestra en la tabla N° 18. Además, el rendimiento de calidad del café pergamino se incrementó de 72 % a 85 %, superando el 78 % alcanzado mediante la selección manual.

Finalmente se elaboró un manual de operación y un plan de mantenimiento preventivo de la máquina automatizada, en los cuales se establecieron procedimientos técnicos para su uso, inspección, limpieza y conservación. Estos documentos contribuyen a asegurar un funcionamiento seguro, confiable y continuo durante las actividades de postcosecha del café.

En conclusión, la fabricación de la máquina automatizada seleccionadora de café pergamino permitió mejorar el rendimiento de calidad del producto y optimizar la eficiencia del proceso de selección frente al método tradicional. Por ello, la máquina constituye una alternativa tecnológica viable para fortalecer las actividades postcosecha y la competitividad de los productores de café del Caserío San Miguel, Tamborapa Pueblo–San Ignacio.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda optimizar el sistema de visión artificial mediante la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo, como redes neuronales, con el fin de incrementar la precisión de clasificación.
- Mejorar las condiciones de iluminación del sistema, incorporando fuentes de luz uniforme y controlada, ya que es factor importante para la calidad de captura de imagen y por ende poder realizar con mayor precisión la clasificación.
- Se recomienda regular y controlar de manera más precisa el flujo de alimentación de café pergamino (caudal), con la finalidad de evitar la superposición de granos y mejorar la capacidad de selección.
- Ampliar el tamaño de muestra de análisis, incluyendo diferentes variedades de café y condiciones de calidad para validad el desempeño del sistema en escenarios reales de producción.
- Evaluar la implementación de cámaras con mayor resolución o sensores industriales, con el fin de mejorar la detección de granos con defecto pequeños y aumentar la precisión del sistema.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorós, J. L., Mallol, G., Sánchez, E., & García, J. (2000). *DISEÑO DE SILOS Y TOLVAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE MATERIALES PULVERULENTOS. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA OPERACIÓN DE DESCARGA*.

Campos Chavez, E. F., & Capuñay Rebilla, W. J. (2022). Automatización con PLC del proceso de trillado de café para planta cafetalera del norte. *Repositorio Institucional - UCV*. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/124268

Cenicafé. (2008). *PROPIEDADES FÍSICAS Y FACTORES DE CONVERSIÓN DEL CAFÉ EN EL PROCESO DE BENEFICIO*.

Chang, S. J., & Huang, C. Y. (2021). Deep learning model for the inspection of coffee bean defects. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(17). https://doi.org/10.3390/app11178226

Cortés Duran, C. (2020). *Evaluación de la implementación de monitores de clasificación en la producción café pergamino seco en el municipio de confines, Santander*. https://noesis.uis.edu.co/items/a5b63af1-06b0-4ed4-acd8-f5810c4a2ccb

Díaz C; Carmen M. (2017). *Libro-cafe_PNUD_PE (1)*. https://www.undp.org/es/peru/publicaciones/linea-de-base-del-sector-cafe-en-el-peru

Espinoza Villafuerte, N. (2019). *Diagnóstico automatizado para la clasificación de café trillado con broca mediante procesamiento de imágenes con Deep Learning*.

Gobierno Regional de Cajamarca. (2021). *PlanDesarrolloRegionalConcertado20211*. https://www.regioncajamarca.gob.pe/media/portal/KJDIG/documento/777/PlanDesarrolloRegionalConcertado20211.pdf

Gómez Cabrera, J. A., & Luna Timaran, F. S. (2023). *Diseño y construcción de un prototipo de máquina seleccionadora de café pergamino seco para el corregimiento de Matituy la Florida Nariño*. http://repositorio.aunar.edu.co:8080/xmlui/handle/20.500.12276/1709?show=full

Gonzabay Jimenez, E. F. (2023). *Procesamiento De Imágenes Para La Clasificación De Granos De Café Por Forma Y Color*. https://repositorio.utmachala.edu.pe.ec/bitstream/48000/21622/1/ESTEBAN%20GONZABAY%20JIMENEZ.pdf

Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez%2C%20Fernandez%20y%20Baptista-metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2023). *Seguridad en los objetos metálicos en contacto con alimentos.*

International Coffee Organization. (2021). *Coffee development report*. https://www.icocoffee.org/wp-content/uploads/2022/11/coffee-development-report-2021.pdf

León León, R. A., Atalaya Morales, E. E., & Narvaez Alvarado, S. B. (2024). Desarrollo de un Software con Visión Artificial para Detectar el Defecto Físico del Grano de Café Verde. *Memorias de La Vigésima Tercera Conferencia Iberoamericana En Sistemas, Cibernética e Informática: CISCI 2024*, 468–474. https://doi.org/10.54808/cisci2024.01.468

Prieto Rodríguez, A. Y. (2024). *Sistema de clasificación multiclase de granos individuales de café utilizando inteligencia artificial*. https://doi.org/10.1/JQUERY.MIN.JS

Puerta Quintero, G. I. (2016). *CALIDAD FÍSICA DEL CAFÉ DE VARIAS REGIONES DE COLOMBIA SEGÚN ALTITUD, SUELOS Y BUENAS PRÁCTICAS DE BENEFICIO* (Vol.

67, Number 1). https://www.cenicafe.org/es/publications/1.Calidad.pdf?utm_source=chatgpt.com

Schulze, D. (2021). *Flow Properties of Powders and Bulk Solids*. https://www.springer.com/us/book/9783030767198

Susanibar, G., Ramirez, J., Sanchez, J., Ramirez, R., & Arroyo, D. (2021). Development of an Automated Machine for Green Coffee Beans Classification by Size and Defects. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 17–24. https://doi.org/10.18178/joaat.8.1.17-24

Tan, S. M., Hung, S. H., & Tsai, J. C. (2024). GCBICT: Green Coffee Bean Identification Command-line Tool. *SoftwareX*, *28*. https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101843

Tirado, J., & Luján, M. (2022). Nivel de ocratoxina A en granos de café (Coffea arabica L.), procedentes de Jaén y San Ignacio, Cajamarca. *Revista Científica Dékamu Agropec*, *3*(2), 44–53. https://doi.org/10.55996/DEKAMUAGROPEC.V3I2.98

AGRADECIMIENTO

Se expresa el más sincero agradecimiento al Grupo de Investigación en Robótica, Inteligencia Artificial e Innovación (RIAI) por su importante participación en el desarrollo del trabajo de investigación denominado "FABRICACIÓN DE MÁQUINA AUTOMATIZADA SELECCIONADORA DE CAFÉ PERGAMINO PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO, EN TAMBORAPA PUEBLO-SAN IGNACIO". Su aporte científico, técnico y metodológico ha sido clave para la ejecución de este estudio, fortaleciendo la generación de conocimiento y la aplicación de soluciones innovadoras en el ámbito productivo.

Agradezco primeramente a Dios por haberme brindado la fuerza y salud necesaria en cada etapa de mi vida profesional, logrando superar cada uno de los obstáculos presentados durante todo este recorrido de formación profesional.

Expreso mi gratitud a la Universidad Nacional de Jaén, y de manera muy especial a la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por haberme brindado los conocimientos y el entorno académico necesario para mi formación. Asimismo, agradezco a mis asesores de tesis, por su orientación y su disposición constante en la supervisión de este proyecto

De manera especial agradezco a mi madre Soledad Pintado, por su amor incondicional y por ser el pilar que sostuvo mis esfuerzos en este camino universitario. También agradezco a mi padre Simeón Mauriola, quien me acompaño con su fuerza y consejos hasta la mitad de este camino universitario y que hoy me bendice con su protección silenciosa desde el cielo.

Finalmente extiendo un agradecimiento especial a los agricultores cafetaleros del caserío San Miguel, quienes me permitieron acceder a sus procesos y compartieron su conocimiento empírico y fueron piezas fundamentales para la investigación.

Alex Mauriola Pintado

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado primeramente a Dios, por ser mi guía y fortaleza inagotable en cada paso que permitió transcender los desafíos de esta etapa. De manera especial, dedico este logro a mis adorables padres, pilares fundamentales de mi formación, quienes con su amor incondicional y su sacrificio en silencio se convirtieron en el principal soporte inquebrantable de mis aspiraciones profesionales. Gracias por ser el refugio de toda la adversidad y el motor que me impulso a seguir con este anhelado sueño, hasta consolidar este gran paso profesional que se logró.

Expreso mi más profunda gratitud a mi madre; quien, con su esfuerzo diario y entrega incondicional, forjó en mi la convicción de que el trabajo digno es el único camino que te lleva hacia la verdadera grandeza. De igual manera honro a mi padre, mi primer maestro de vida quien me enseño que nunca hay que rendirse ante cualquier adversidad. Aunque su presencia ahora trasciende al plano celestial, percibo su protección silenciosa en cada paso que doy.

Alex Mauriola Pintado

A mis queridos padres, a mis amados hijos y a toda mi familia:

Les expreso mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional, su amor y su constante motivación a lo largo de este proceso. Gracias por acompañarme en cada etapa, por brindarme fortaleza en los momentos difíciles y por creer en mí incluso cuando el camino parecía incierto.

Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, quienes han sido el pilar fundamental para alcanzar mis objetivos. Su apoyo único e invaluable ha sido la fuerza que me impulsó a seguir adelante y culminar esta meta tan importante en mi vida.

William Peña Maza

ANEXOS

Anexo 1

Visitas a campo agricultor 1



Nota: En la figura se observa el movimiento de grano para eliminar impurezas y posteriormente iniciar con la selección de granos. Fuente: Elaboración propia (2026)

Anexo 2

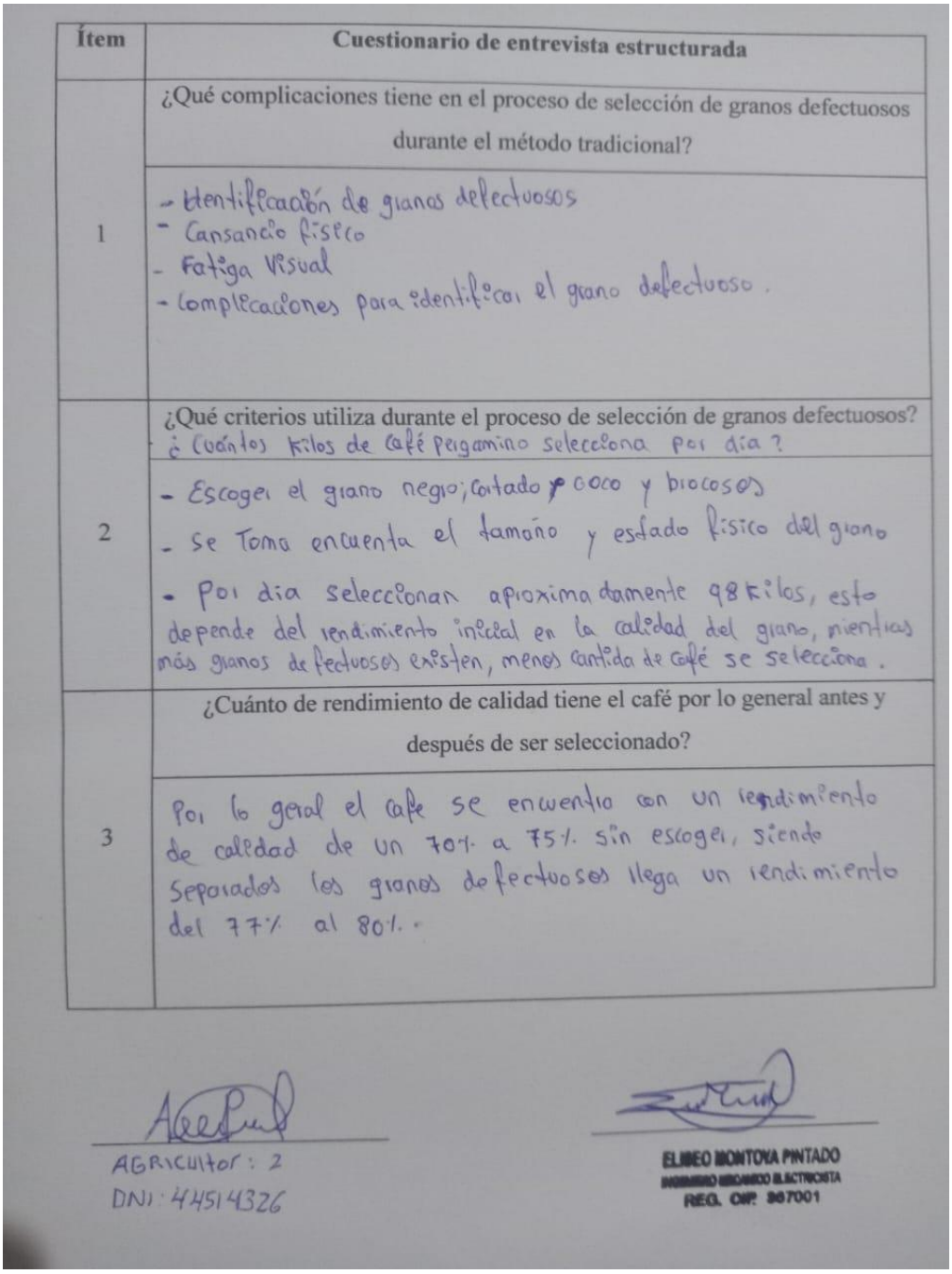
Visitas a campo agricultor 2



Nota: En la figura se observa la selección de granos defectuosos de manera tradicional. Fuente: Elaboración propia (2026)

Anexo 3

Resultados del cuestionario aplicado



Ítem	Cuestionario de entrevista estructurada
1	¿Qué complicaciones tiene en el proceso de selección de granos defectuosos durante el método tradicional?
	- Identificación de granos defectuosos - Cansancio físico - Fatiga visual - Complicaciones para identificar el grano defectuoso.
2	¿Qué criterios utiliza durante el proceso de selección de granos defectuosos? ¿Cuántos kilos de café pergamino selecciona por día?
	- Escogen el grano negro, cortado, coco y brocosos - Se toma en cuenta el tamaño y estado físico del grano - Por día seleccionan aproximadamente 98 kilos, esto depende del rendimiento inicial en la calidad del grano, mientras más granos defectuosos existen, menos cantidad de café se selecciona.
3	¿Cuánto de rendimiento de calidad tiene el café por lo general antes y después de ser seleccionado?
	Por lo general el cafe se encuentra con un rendimiento de calidad de un 70% a 75% sin escoger, siendo separados los granos defectuosos llega un rendimiento del 77% al 80%.

AGRICULTOR: 2
DNI: 44514326

ELIBEO MONTOYA PINTADO
REG. CIP: 267001

Nota: En la imagen se muestra las preguntas realizadas a los agricultores. Fuente: Elaboración propia (2026)

Anexo 4

Registro de recolección de datos en campo

RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO				
Rendimiento de calidad del café general				Tiempo de selección Por día
Agricultor	65 - 70 %	70 - 75 %	75 - 80 %	
1		Selecciono 98 kg entre estos rangos de rendimiento.		Jornada de 8 horas
2		Rendimiento inicial seleccionó 98 kg		Jornada de 8 horas
Para la muestra de 15 kilos de café pergamino				
Agricultor	65 - 70 %	70 - 75 %	75 - 80 %	Tiempo de selección
1		Rendimiento inicial 72 %	Rendimiento final 78 %	Se seleccionó en 62 minutos.
2		Rendimiento inicial 72 %	Rendimiento final 78 %	Se seleccionó en 67 minutos.

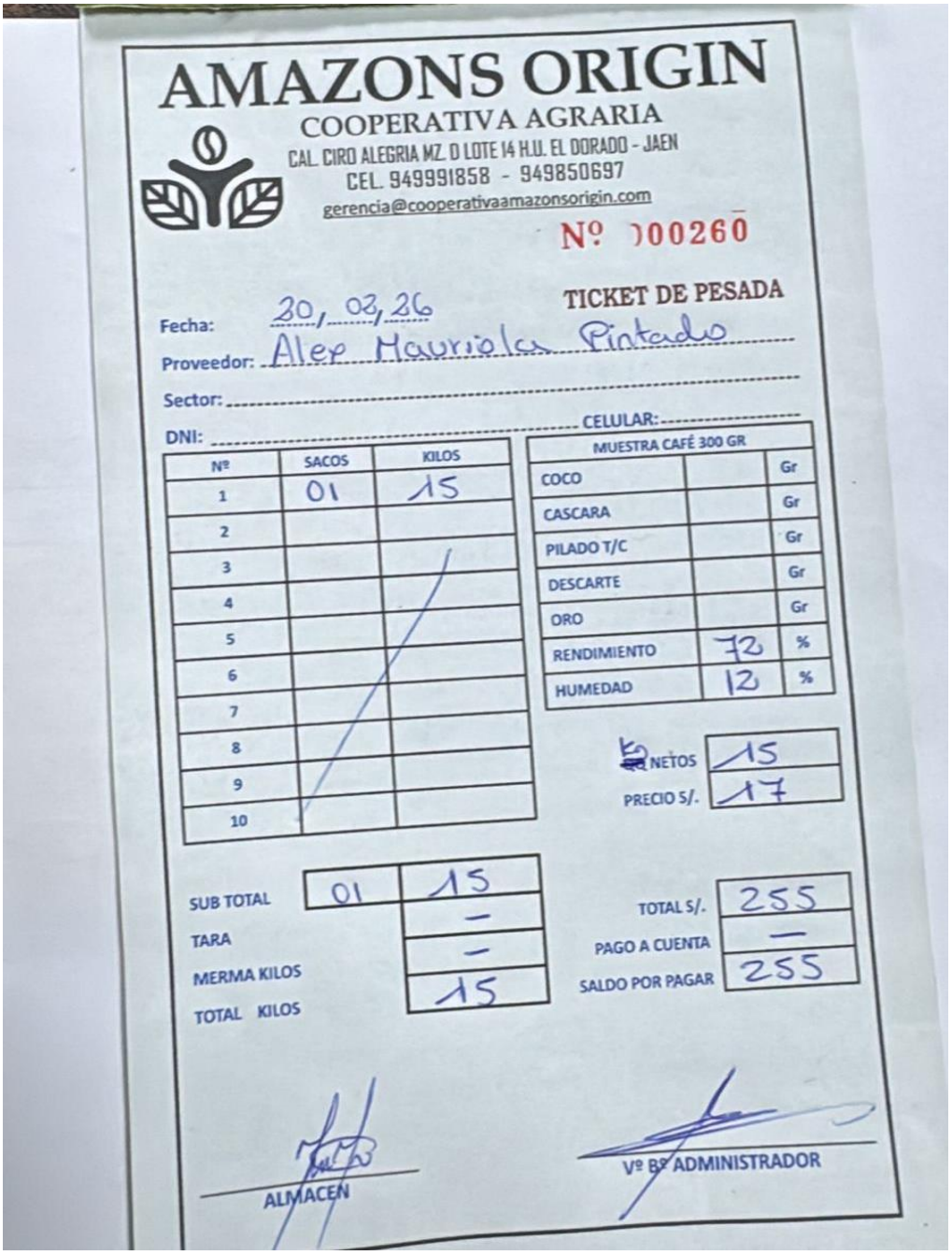
AGRICULTOR : 2
DNI : 44514326

ELISEO MONTOYA PINTADO
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
REG. CIP. 367001

Nota: La imagen muestra los apuntes de la recolección de datos en el campo. Fuente: Elaboración propia (2026)

Anexo 5

Ficha técnica de rendimiento inicial de la muestra de 15 kg



AMAZONS ORIGIN

COOPERATIVA AGRARIA

CAL. CIRO ALEGRIA MZ. D LOTE 14 H.U. EL DORADO - JAEN

CEL. 949991858 - 949850697

gerencia@cooperativaamazonsorigin.com

Nº 000260

TICKET DE PESADA

Fecha: 30/03/26

Proveedor: Alex Mauricio Pintado

Sector:

DNI: CELULAR:

Nº	SACOS	KILOS
1	01	15
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

MUESTRA CAFÉ 300 GR		
COCO		Gr
CASCARA		Gr
PILADO T/C		Gr
DESCARTE		Gr
ORO		Gr
RENDIMIENTO	72	%
HUMEDAD	12	%

NETOS	15
PRECIO S/.	17

SUB TOTAL	01	15
TARA		—
MERMA KILOS		—
TOTAL KILOS		15

TOTAL S/.	255
PAGO A CUENTA	—
SALDO POR PAGAR	255

ALMACEN

Vº Bº ADMINISTRADOR

Nota: La imagen muestra el rendimiento inicial de la muestra utilizado para la el procesamiento de datos tanto manual como automático. Fuente: Cooperativa Agraria Amazons (2026)

Anexo 6

Ficha técnica de resultado del rendimiento en calidad por método manual



AMAZONS ORIGIN
COOPERATIVA AGRARIA
CAL. CIRO ALEGRIA MZ. D LOTE 14 H.U. EL DORADO - JAEN
CEL. 949991858 - 949850697
gerencia@cooperativaamazonsorigin.com

Nº 000261

TICKET DE PESADA

Fecha: 20/03/26
Proveedor: Alex Mauriola Pintado
Sector:
DNI: CELULAR:

Nº	SACOS	KILOS
1	01	15
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

MUESTRA CAFÉ 300 GR		
COCO		Gr
CASCARA		Gr
PILADO T/C		Gr
DESCARTE		Gr
ORO		Gr
RENDIMIENTO	78	%
HUMEDAD	12	%

Kg NETOS	15
PRECIO S/.	18

SUB TOTAL	01	15
TARA		—
MERMA KILOS		—
TOTAL KILOS		15

TOTAL S/.	270
PAGO A CUENTA	—
SALDO POR PAGAR	270

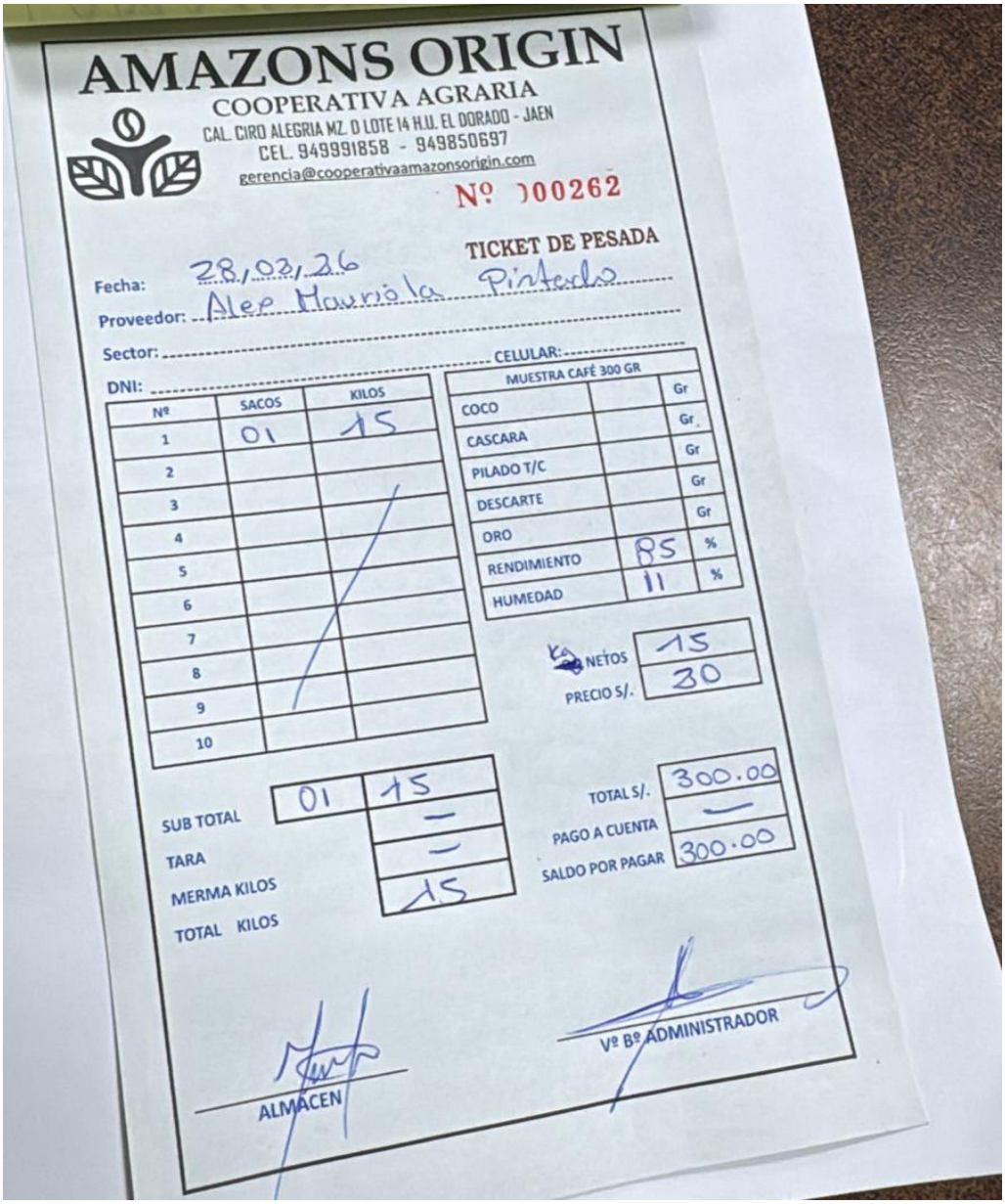
ALMACEN

Vº Bº ADMINISTRADOR

Nota: La imagen muestra el rendimiento de calidad del café pergamino de las muestras realizadas por el método tradicional. Fuente: Cooperativa Agraria Amazons (2026)

Anexo 7

Ficha técnica de resultado del rendimiento en calidad por método automático



AMAZONS ORIGIN
COOPERATIVA AGRARIA
CAL. CIRO ALEGRIA MZ. D LOTE 14 H.U. EL DORADO - JAEN
CEL. 949991858 - 949850697
gerencia@cooperativaamazonsorigin.com

Nº 000262

TICKET DE PESADA

Fecha: 28/03/26
Proveedor: Alex Mauricio Pinedo
Sector:
CELULAR:
DNI:

Nº	SACOS	KILOS
1	01	15
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

MUESTRA CAFÉ 300 GR		
COCO		Gr
CASCARA		Gr
PILADO T/C		Gr
DESCARTE		Gr
ORO		Gr
RENDIMIENTO	85	%
HUMEDAD	11	%

Kg NETOS	15
PRECIO S/.	30

SUB TOTAL	01	15
TARA		—
MERMA KILOS		—
TOTAL KILOS		15

TOTAL S/.	300.00
PAGO A CUENTA	—
SALDO POR PAGAR	300.00

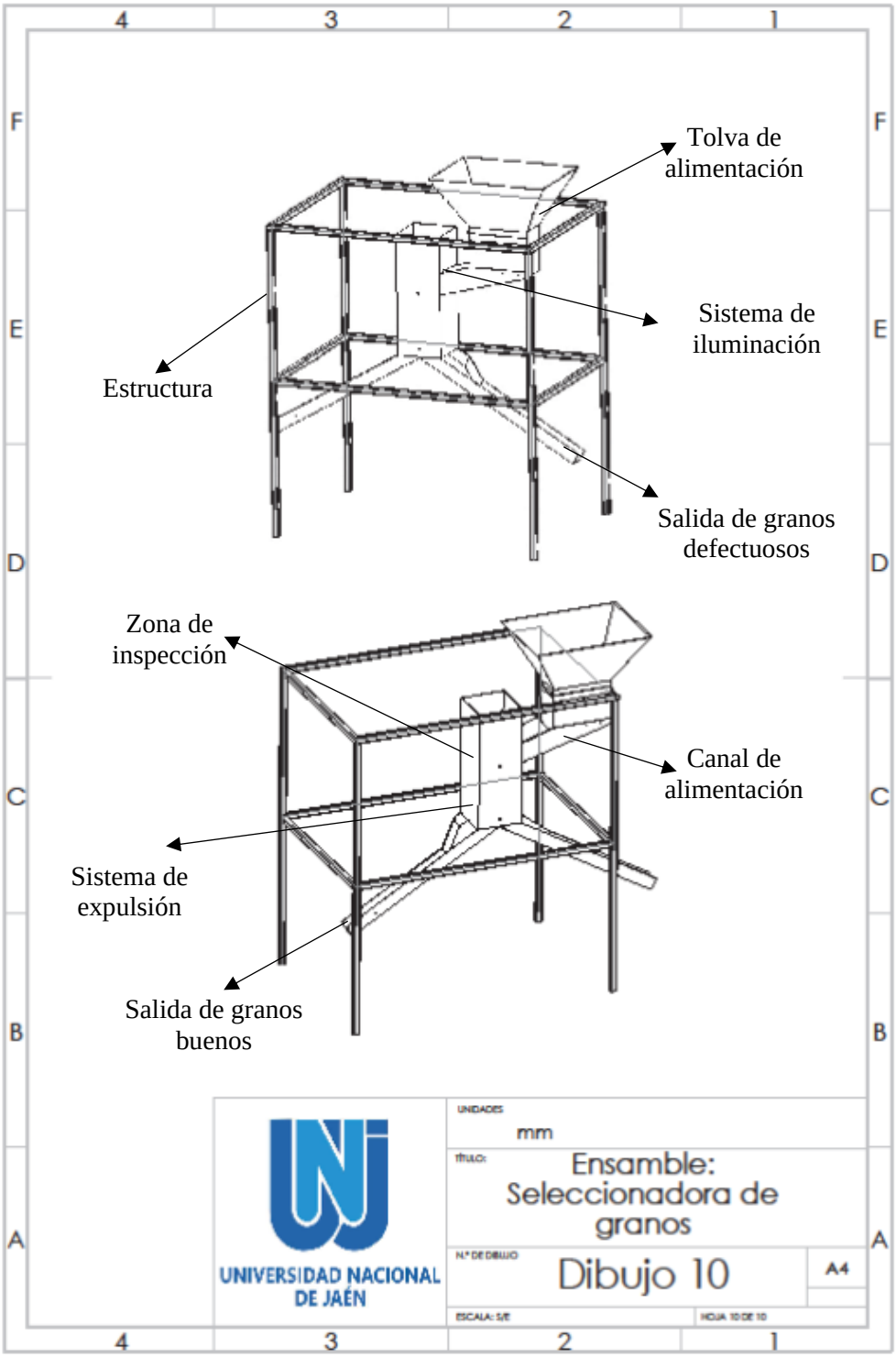
ALMACEN

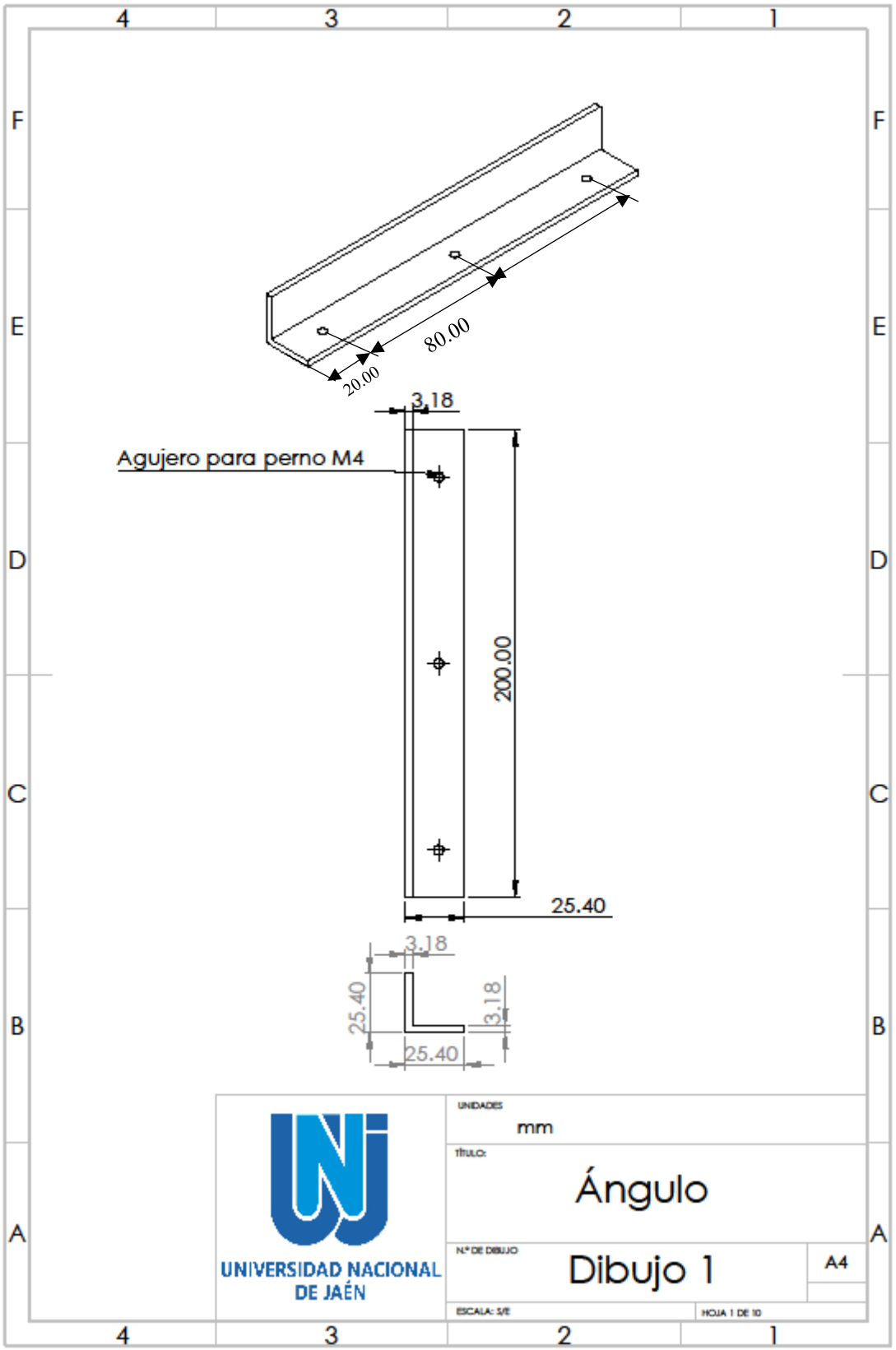
Vº Bº ADMINISTRADOR

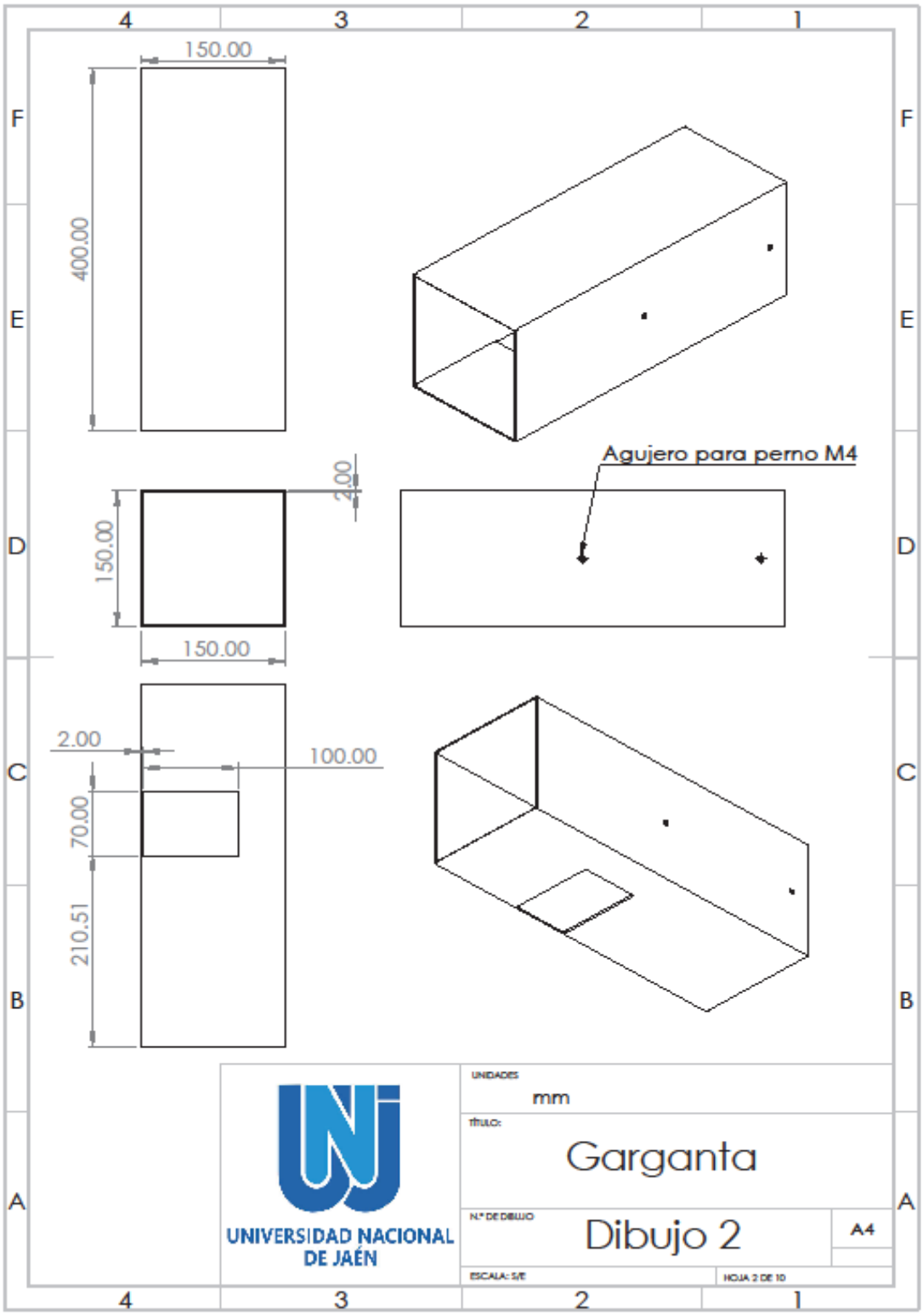
Nota: La imagen muestra el rendimiento de calidad del café pergamino de las muestras realizadas por el método automático: Fuente: Cooperativa Agraria Amazons (2026)

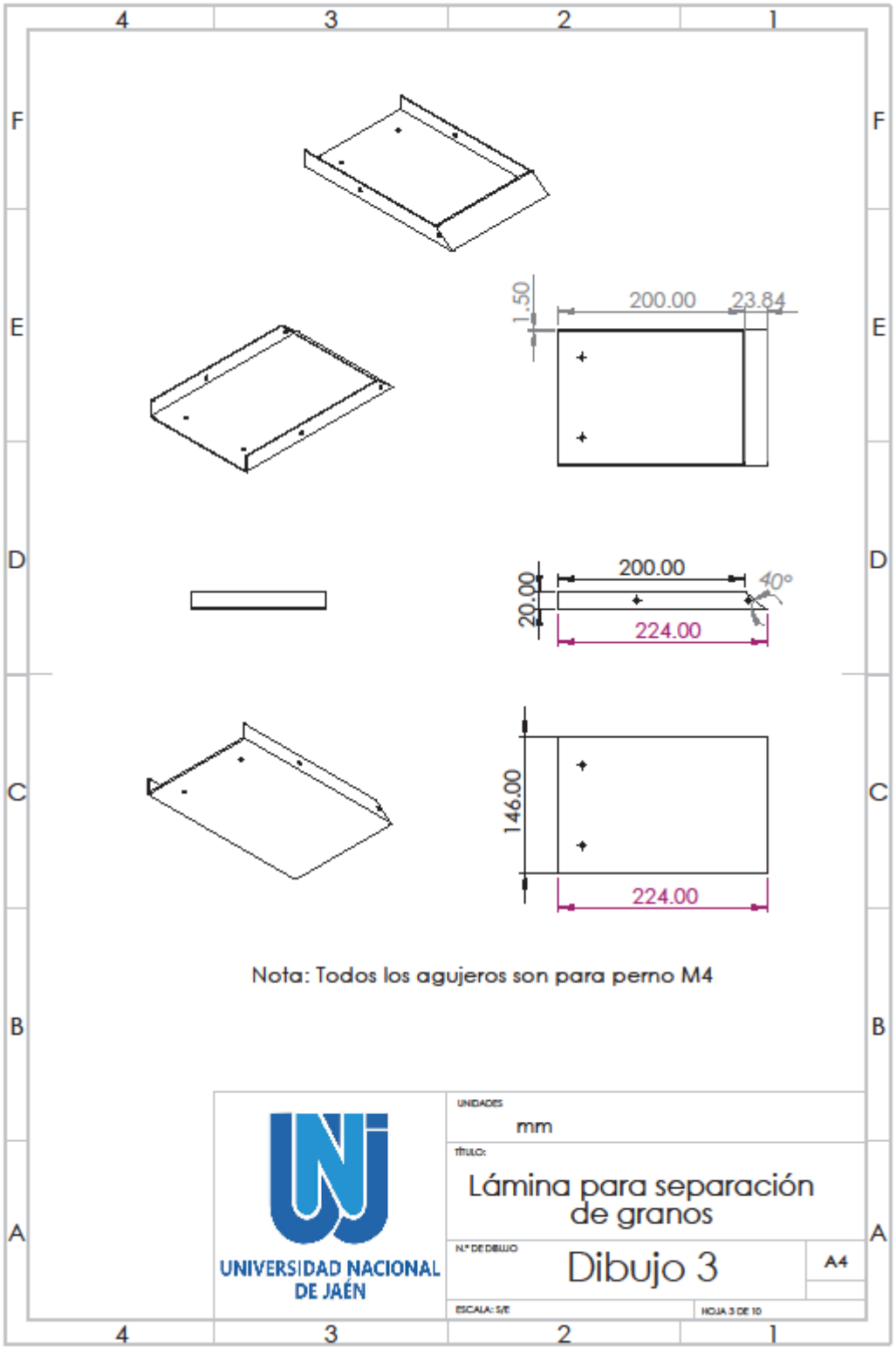
Anexo 8

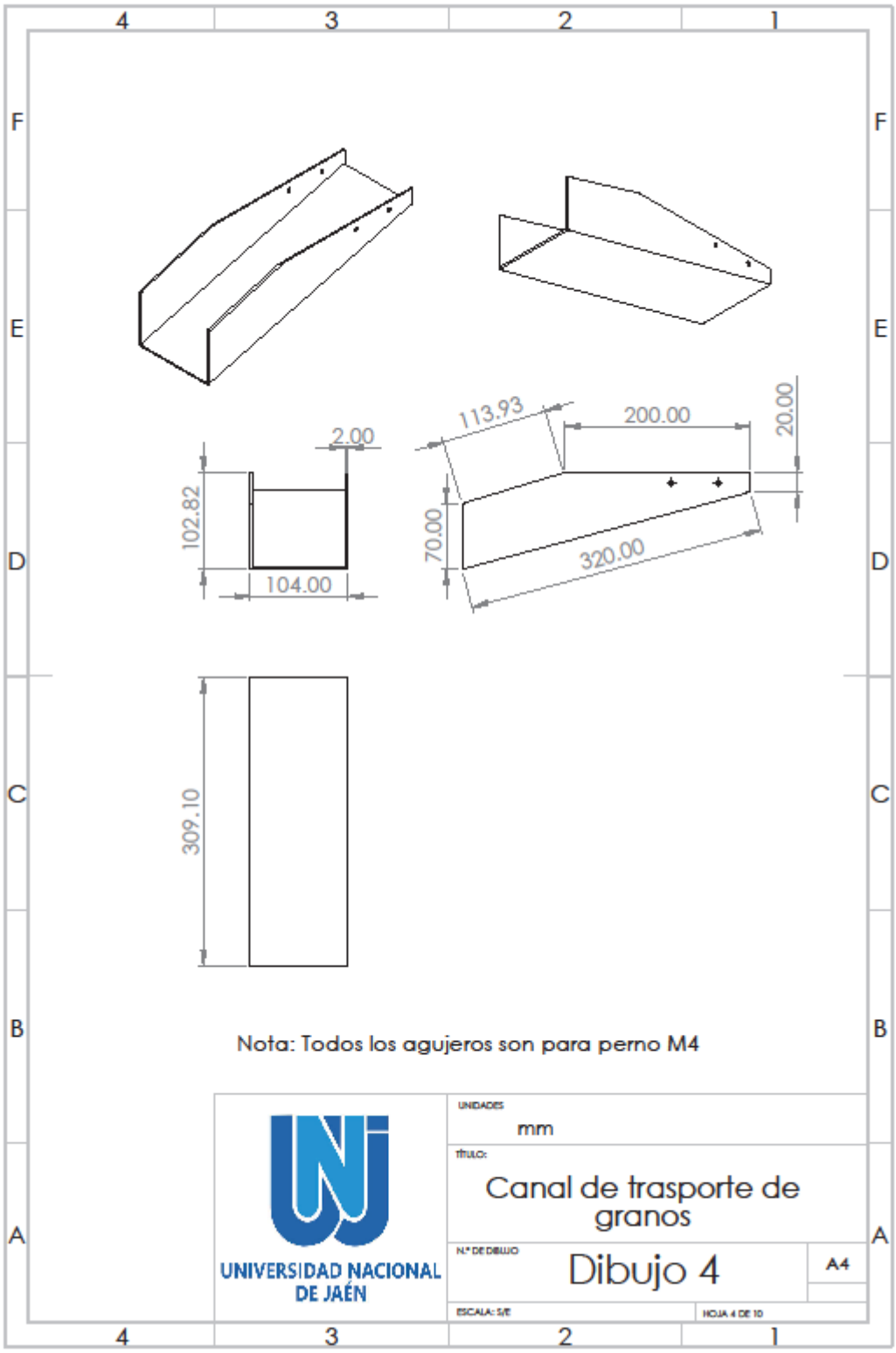
Planos de estructura mecánica de la máquina (cotas en milímetros)



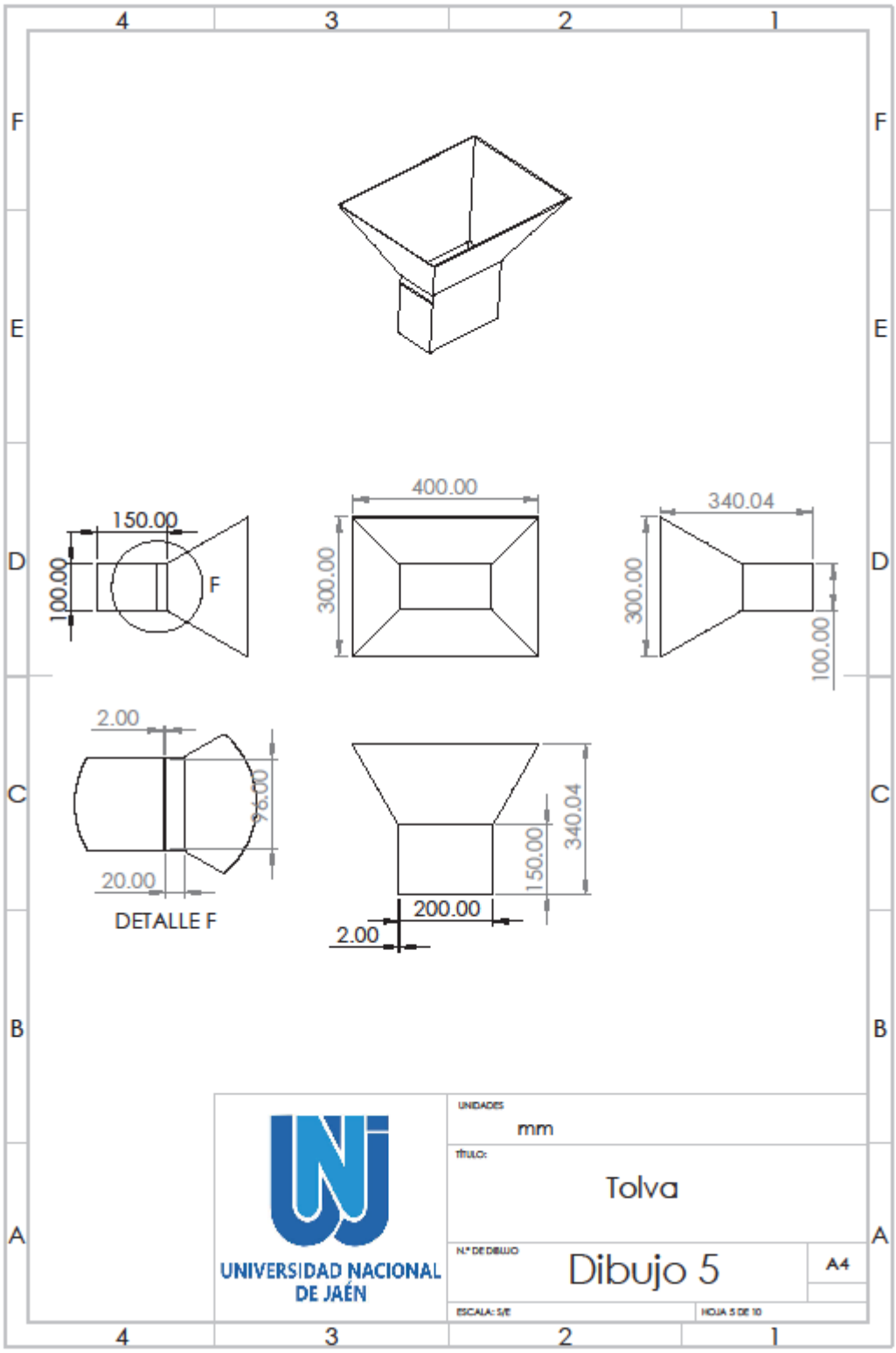

4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
80.00
20.00
3.18
Agujero para perno M4
200.00
25.40
3.18
25.40
3.18
25.40
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Ángulo
Nº DE DIBUJO
Dibujo 1
A4
ESCALA: 5/E
HOJA 1 DE 10


150.00
400.00
2.00
150.00
150.00
Agujero para perno M4
2.00
100.00
70.00
210.51
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Garganta
Dibujo 2
A4
ESCALA: S/E
HOJA 2 DE 10

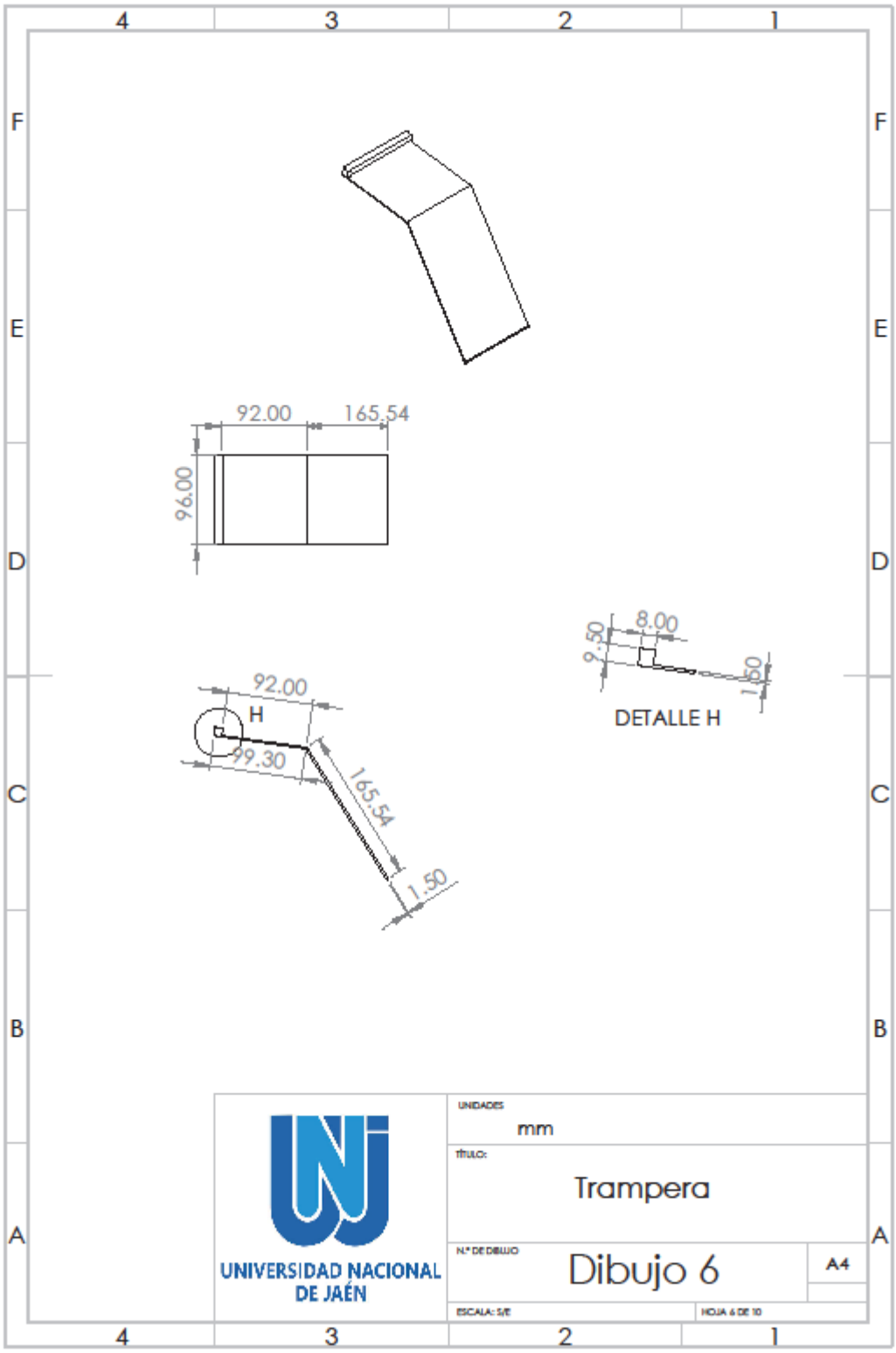

4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
1.50
200.00
23.84
200.00
40°
20.00
224.00
146.00
224.00
Nota: Todos los agujeros son para perno M4
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Lámina para separación de granos
N.º DE DIBUJO
Dibujo 3
A4
ESCALA: S/E
HOJA 3 DE 10

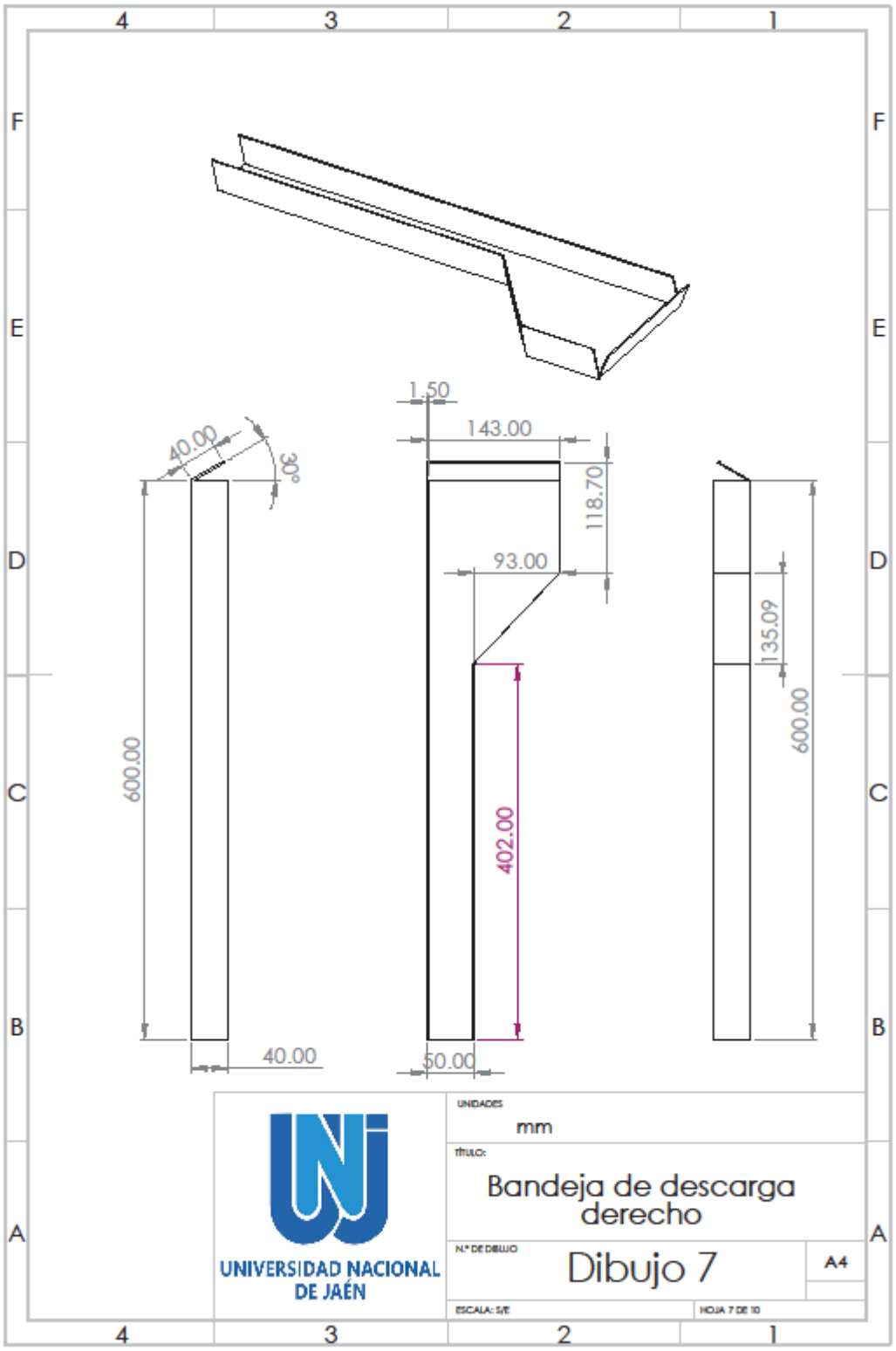

4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
2.00
102.82
104.00
113.93
200.00
20.00
70.00
320.00
309.10
Nota: Todos los agujeros son para perno M4
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Canal de trasporte de granos
Nº DE DIBUJO
Dibujo 4
A4
ESCALA: S/E
HOJA 4 DE 10

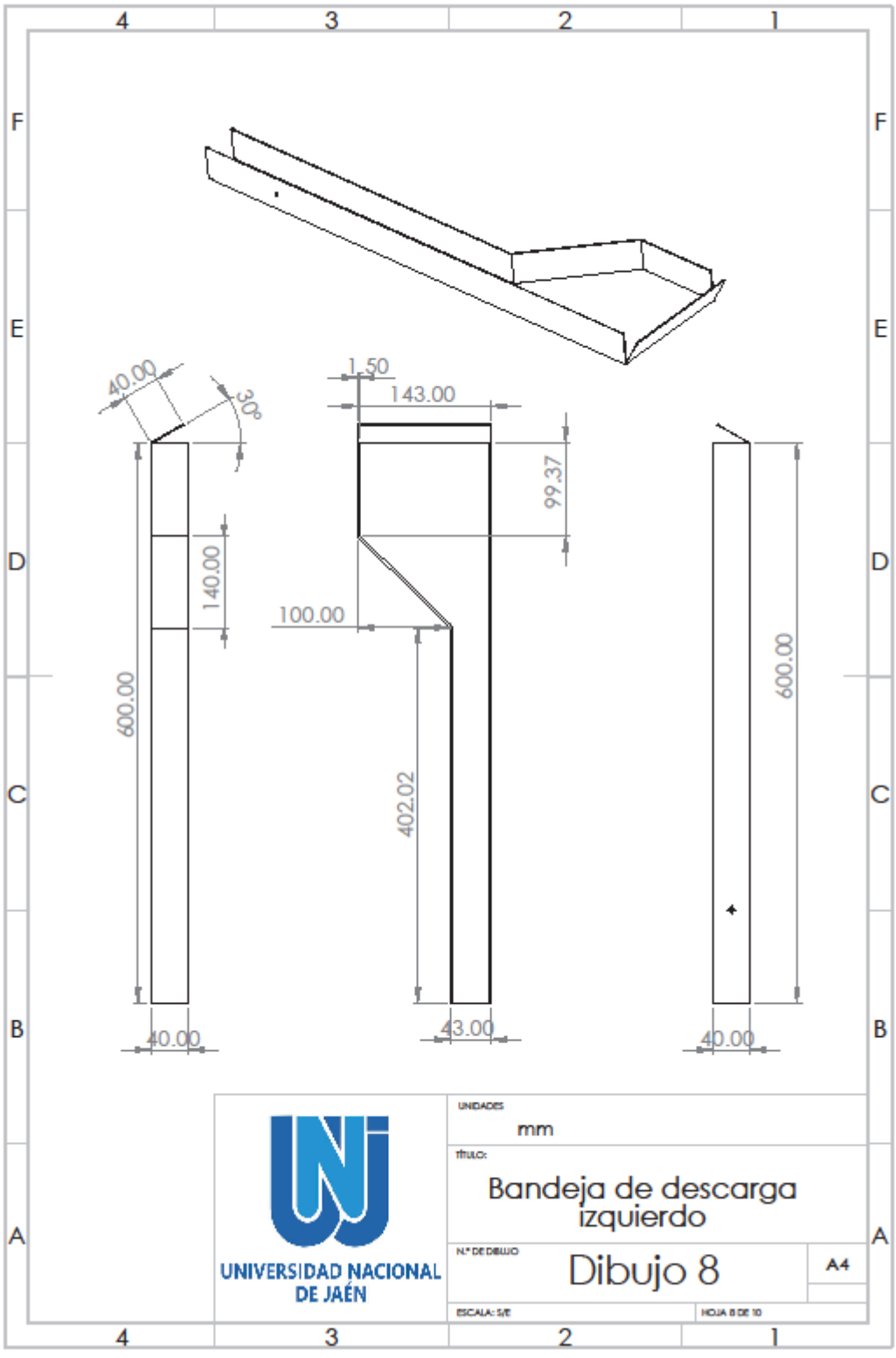
C


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
150.00
100.00
F
400.00
300.00
340.04
300.00
100.00
2.00
96.00
20.00
DETALLE F
340.04
150.00
200.00
2.00
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Tolva
Nº DE DIBUJO
Dibujo 5
A4
ESCALA: S/E
HOJA 5 DE 10

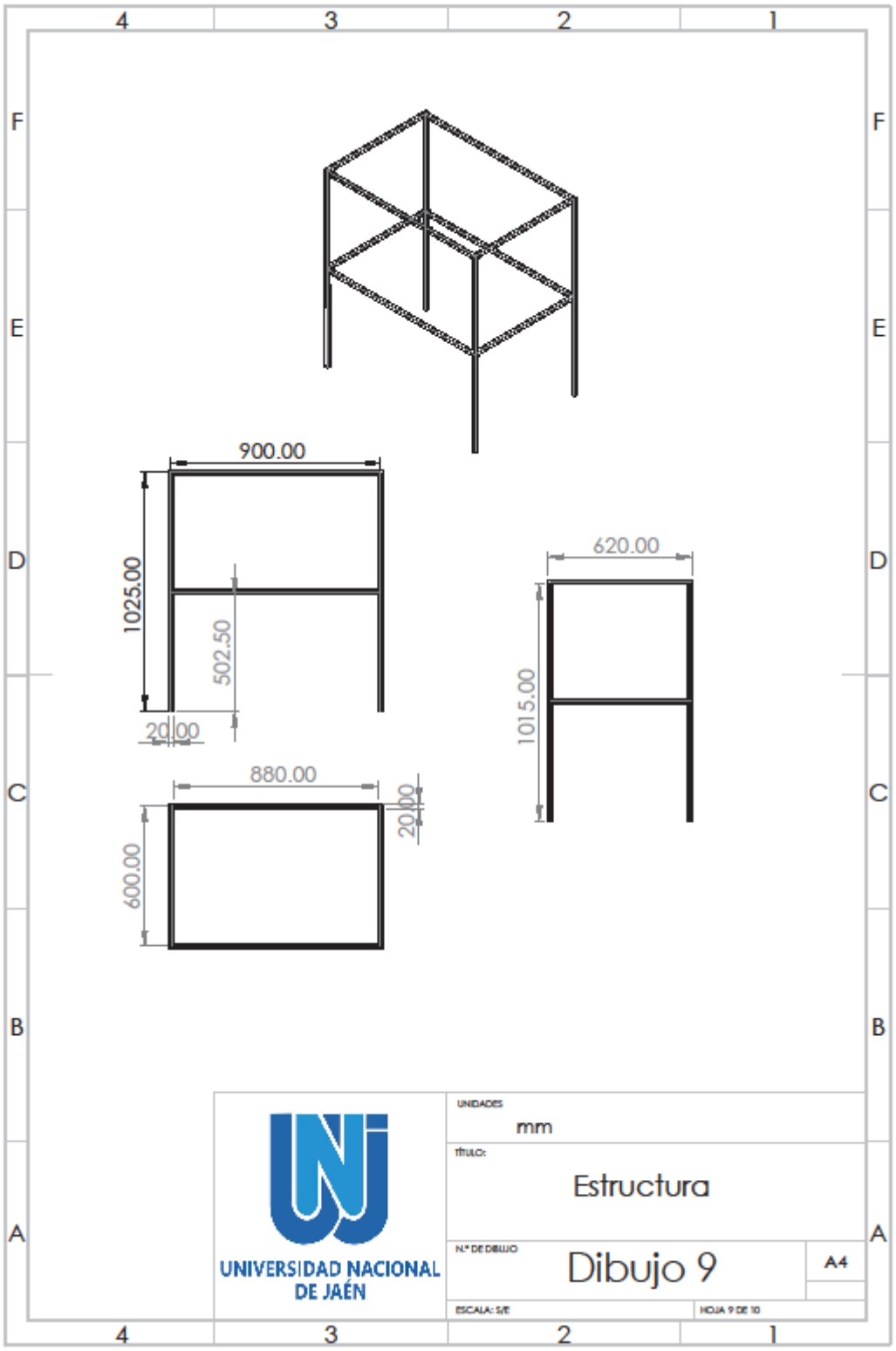
ci


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
92.00
165.54
96.00
92.00
H
99.30
165.54
1.50
8.00
9.50
1.60
DETALLE H
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Trampera
Nº DE DIBUJO
Dibujo 6
A4
ESCALA: S/E
HOJA 6 DE 10


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
1.50
143.00
40.00
30°
118.70
93.00
135.09
600.00
600.00
402.00
40.00
50.00
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Bandeja de descarga derecho
Nº DE DIBUJO
Dibujo 7
A4
ESCALA: S/E
HOJA 7 DE 10


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
40.00
30°
1.50
143.00
99.37
140.00
100.00
600.00
402.02
600.00
40.00
43.00
40.00
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Bandeja de descarga izquierdo
Nº DE DIBUJO
Dibujo 8
A4
ESCALA: S/E
HOJA 8 DE 10

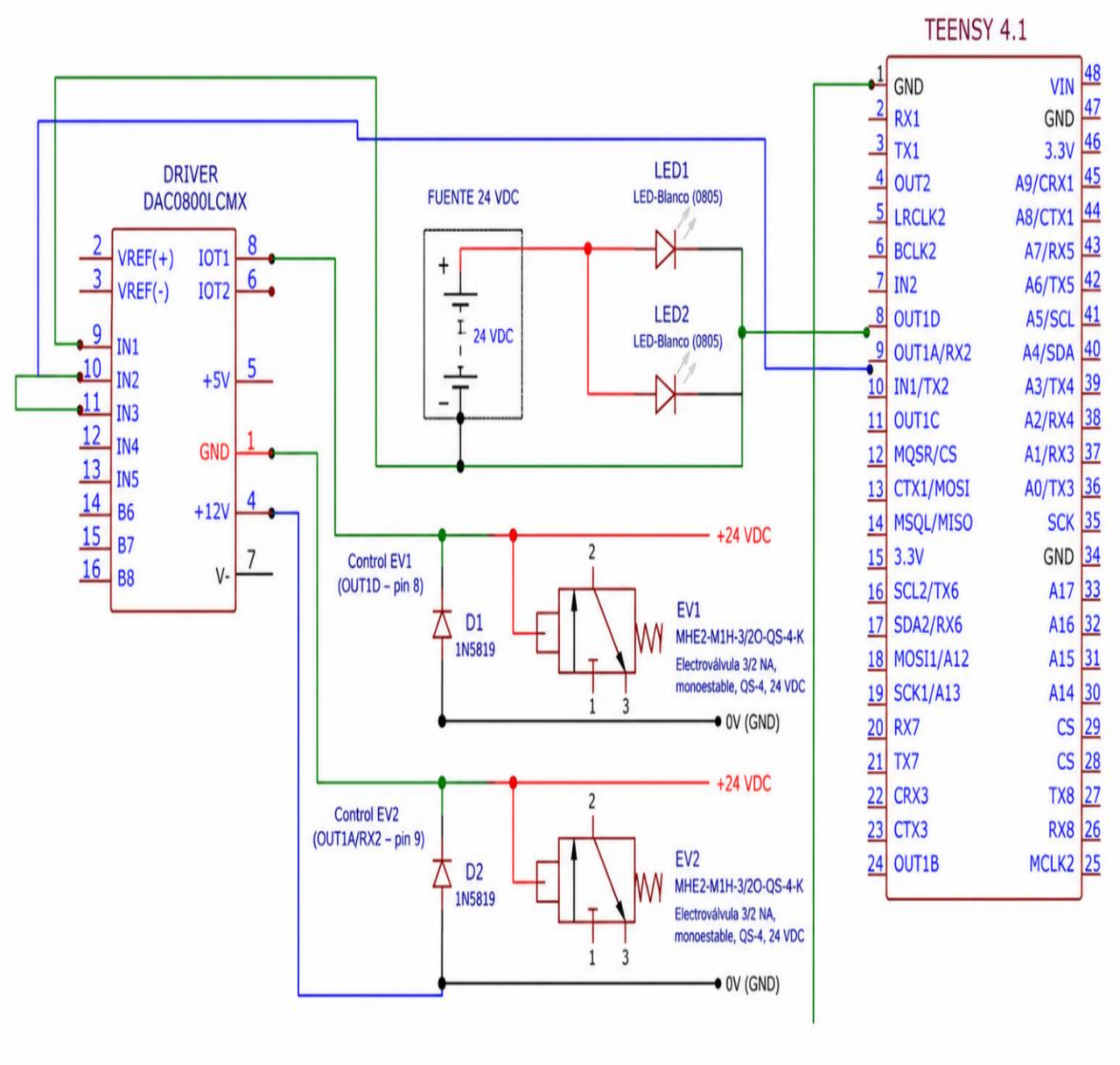
civ


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
900.00
1025.00
502.50
20.00
620.00
1015.00
880.00
20.00
600.00
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
UNIDADES
mm
TÍTULO:
Estructura
Nº DE DIBUJO
Dibujo 9
A4
ESCALA: S/E
HOJA 9 DE 10

CV

Anexo 9

Diagrama del circuito de control



Fuente: Elaboración propia (2026)

Fabricación de la máquina

Anexo 10

Evidencias de fabricación de la máquina



Nota: Recorte del canal de trasporte con disco de corte. Fuente elaboración propia (2026).

Ensamble del canal de trasporte



Nota: En la figura se observa cómo se realizó en ensamble de las piezas de transporte de los granos. Fuente: Elaboración propia (2026)

Ensamble de tolva hacia la estructura.



Nota: En la figura se observa el ensamble de la tolva con el canal de tranporte.Fuente: Elaboración Propia.(2026)

Ensamble final de laa tolva a la estruptura



Nota: En la figura se observa como quedo la tolva ensamblada totalmente despues de unir las piezas. Fuente: Elaboración propia (2026)

Fabicacion completa de la máquina automatizada



Nota: En la figura se observa la fabricacion completa de la máquina automatizada. Fuente: Elaboración propia (2026)

Pruevas de la máquina



Nota: En la figura se observa el proceso de la selección de la máquina automatizada.Fuente: Elaboración propia (2026)

Código fuente del sistema de procesamiento de imagen en envió de señales al Teensy 4.1,

ejecutado en Pyton

Anexo 11

Código fuente del sistema de visión artificial

```
import cv2
import numpy as np
import time
import serial
import serial.tools.list_ports
from collections import deque
from threading import Thread

# CONFIGURACIÓN PRINCIPAL DEL SISTEMA

CAMARA_ID = 1            # Cambiar a 0 si no abre la cámara
BAUDRATE = 500000

UMBRAL_AREA_MIN = 150
UMBRAL_AREA_MAX = 8000

ROI_Y1 = 50
ROI_Y2 = 450

Y_DISPARO_PIX = 340

COMANDO_COCO = b"C\n"
COMANDO_BROCOSO = b"B\n"


class WebcamStream:
    def __init__(self, src=0):
        self.cap = cv2.VideoCapture(src)
        self.cap.set(cv2.CAP_PROP_BUFFERSIZE, 1)
        self.cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 640)
        self.cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, 480)

        self.ret, self.frame = self.cap.read()
        self.stopped = False

    def start(self):
        Thread(target=self.update, daemon=True).start()
```

```
        return self

    def update(self):
        while not self.stopped:
            ret, frame = self.cap.read()
            if ret:
                self.ret = ret
                self.frame = frame
            else:
                self.stopped = True

    def read(self):
        return self.frame

    def stop(self):
        self.stopped = True
        self.cap.release()


def conectar_teensy():
    puertos = list(serial.tools.list_ports.comports())

    for p in puertos:
        descripcion = p.description.lower()
        dispositivo = p.device.lower()

        if "teensy" in descripcion or "usb" in descripcion or "serial" in descripcion or "com" in
dispositivo:
            try:
                ser = serial.Serial(p.device, BAUDRATE, timeout=0)
                time.sleep(2)
                print(f"Teensy conectado en: {p.device}")
                return ser
            except Exception as e:
                print(f"No se pudo conectar en {p.device}: {e}")

    print("No se encontró Teensy. El sistema funcionará solo con cámara.")
    return None


def enviar_comando(ser, comando):
    if ser is not None:
        try:
            ser.write(comando)
        except Exception as e:
            print("Error enviando comando:", e)
```

```
def clasificar_grano(roi_grano):
    if roi_grano is None or roi_grano.size == 0:
        return "BUENO"

    hsv = cv2.cvtColor(roi_grano, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    gray = cv2.cvtColor(roi_grano, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    h = hsv[:, :, 0]
    s = hsv[:, :, 1]
    v = hsv[:, :, 2]

    mascara_valida = (v > 30) & (s > 20)

    if np.count_nonzero(mascara_valida) < 20:
        return "BUENO"

    h_med = np.median(h[mascara_valida])
    s_med = np.median(s[mascara_valida])
    v_med = np.median(v[mascara_valida])

    pixeles_oscuros = np.count_nonzero(gray < 65)
    pixeles_totales = gray.size
    porcentaje_oscuro = pixeles_oscuros / pixeles_totales

    if porcentaje_oscuro > 0.08 and v_med < 180:
        return "BROCOSO"

    es_amarillento = 18 <= h_med <= 45 and s_med > 35 and v_med > 90
    es_palido = s_med < 75 and v_med > 120

    if es_amarillento or es_palido:
        return "COCO"

    return "BUENO"


teensy = conectar_teensy()

vs = WebcamStream(src=CAMARA_ID).start()
time.sleep(2)

granos_activos = {}
proximo_id = 0
```

```
print("Sistema iniciado.")
print("C = Coco | B = Brocoso | Q = Salir")

while True:
    frame = vs.read()

    if frame is None:
        print("No se recibe imagen de la cámara.")
        break

    roi_img = frame[ROI_Y1:ROI_Y2, :].copy()
    hsv_roi = cv2.cvtColor(roi_img, cv2.COLOR_BGR2HSV)

    mask_blue = cv2.inRange(
        hsv_roi,
        np.array([90, 50, 20]),
        np.array([135, 255, 255])
    )

    mask_objetos = cv2.bitwise_not(mask_blue)

    kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE, (5, 5))
    mask_clean = cv2.morphologyEx(mask_objetos, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
    mask_clean = cv2.morphologyEx(mask_clean, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)

    cnts, _ = cv2.findContours(mask_clean, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

    t_actual = time.time()
    nuevos_granos = {}

    for c in cnts:
        area = cv2.contourArea(c)

        if area < UMBRAL_AREA_MIN or area > UMBRAL_AREA_MAX:
            continue

        x, y, w, h_box = cv2.boundingRect(c)
        cx = x + w // 2
        cy = y + h_box // 2

        id_asig = None
        menor_distancia = 9999

        for g_id, data in granos_activos.items():
            last_cx, last_cy = data["pos"][-1]
```

```
    distancia = np.sqrt((cx - last_cx) ** 2 + (cy - last_cy) ** 2)

    if distancia < 60 and distancia < menor_distancia:
        menor_distancia = distancia
        id_asig = g_id

if id_asig is None:
    id_asig = proximo_id
    proximo_id += 1

    granos_activos[id_asig] = {
        "pos": deque(maxlen=10),
        "disparado": False,
        "tipo": "BUENO",
        "t_last": t_actual
    }

data = granos_activos[id_asig]
data["pos"].append((cx, cy))
data["t_last"] = t_actual

margen = 5
x1 = max(x - margen, 0)
y1 = max(y - margen, 0)
x2 = min(x + w + margen, roi_img.shape[1])
y2 = min(y + h_box + margen, roi_img.shape[0])

roi_grano = roi_img[y1:y2, x1:x2]

tipo = clasificar_grano(roi_grano)
data["tipo"] = tipo

if not data["disparado"] and cy >= Y_DISPARO_PIX:

    if tipo == "COCO":
        enviar_comando(teensy, COMANDO_COCO)
        data["disparado"] = True
        print("Disparo: COCO")

    elif tipo == "BROCOSO":
        enviar_comando(teensy, COMANDO_BROCOSO)
        data["disparado"] = True
        print("Disparo: BROCOSO")

    else:
        data["disparado"] = True
```

```
                print("Grano bueno: sin disparo")

        nuevos_granos[id_asig] = data

        if tipo == "COCO":
            color = (0, 255, 255)
        elif tipo == "BROCOSO":
            color = (0, 0, 255)
        else:
            color = (0, 255, 0)

        cv2.rectangle(roi_img, (x, y), (x + w, y + h_box), color, 2)

        cv2.putText(
            roi_img,
            tipo,
            (x, y - 5),
            cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
            0.6,
            color,
            2
        )

        cv2.circle(roi_img, (cx, cy), 4, color, -1)

    granos_activos = nuevos_granos

    cv2.line(
        roi_img,
        (0, Y_DISPARO_PIX),
        (roi_img.shape[1], Y_DISPARO_PIX),
        (255, 255, 255),
        2
    )

    cv2.imshow("Seleccion de granos defectuosos", roi_img)
    cv2.imshow("Mascara de deteccion", mask_clean)

    tecla = cv2.waitKey(1) & 0xFF

    if tecla == ord("q"):
        break

vs.stop()

if teensy is not None:
```

```
    teensy.close()

cv2.destroyAllWindows()
```

Código fuente del sistema de visión artificial para la clasificacion de granos defectuosos.

Anexo 12

Código de control para Teensy 4.1

```
// Control de dos electroválvulas para selección de café
// Defectos: COCO y BROCOSO

const int VALVULA_COCO = 2;
const int VALVULA_BROCOSO = 3;

const unsigned long TIEMPO_DISPARO_MS = 40;

bool cocoActivo = false;
bool brocosoActivo = false;

unsigned long tiempoCoco = 0;
unsigned long tiempoBrocoso = 0;

void setup() {
  Serial.begin(500000);

  pinMode(VALVULA_COCO, OUTPUT);
  pinMode(VALVULA_BROCOSO, OUTPUT);

  digitalWrite(VALVULA_COCO, LOW);
  digitalWrite(VALVULA_BROCOSO, LOW);

  delay(1000);

  Serial.println("Teensy 4.1 listo para controlar electroválvulas.");
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    char comando = Serial.read();

    if (comando == 'C') {
      digitalWrite(VALVULA_COCO, HIGH);
```

```
      cocoActivo = true;
      tiempoCoco = millis();
      Serial.println("Electrovalvula COCO activada");
    }

    else if (comando == 'B') {
      digitalWrite(VALVULA_BROCOSO, HIGH);
      brocosoActivo = true;
      tiempoBrocoso = millis();
      Serial.println("Electrovalvula BROCOSO activada");
    }
  }

  if (cocoActivo && millis() - tiempoCoco >= TIEMPO_DISPARO_MS) {
    digitalWrite(VALVULA_COCO, LOW);
    cocoActivo = false;
  }

  if (brocosoActivo && millis() - tiempoBrocoso >= TIEMPO_DISPARO_MS) {
    digitalWrite(VALVULA_BROCOSO, LOW);
    brocosoActivo = false;
  }
}
```