

Diseño e implementación de un prototipo de banda transportadora para la identificación automática de productos cítricos mediante inteligencia artificial.

Juliana Lucia Pineda Cardozo y Sergio Andrés Jimenez Buitrago

Director

Hans Garcia Arenas

Doctor of Philosophy

Codirector

Henry Arguello

Doctor of Philosophy

Codirector

Pablo Gomez

Ingeniero

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería electrónica

Bucaramanga

2024

## **Dedicatoria**

*Agradezco de corazón a mi mamá por su constante apoyo, amor incondicional y sabias palabras que siempre guían mi camino. Su dedicación y sacrificio han sido mi mayor inspiración.*

*A mi hermana, quien siempre ha estado a mi lado brindándome aliento y apoyo incondicional en cada paso del camino. Su presencia ha sido una fuente constante de alegría y motivación.*

*A mi abuela, por su amor incondicional, sabiduría y apoyo inquebrantable. Sus consejos y palabras de aliento han sido un faro en los momentos más oscuros.*

*A mi amiga Jessica, cuya presencia y apoyo han sido un bálsamo en los momentos de dificultad. Su amistad y compañerismo han sido un regalo invaluable.*

*A cada persona que ha contribuido de alguna manera a este proyecto, ya sea con sus palabras de aliento, su apoyo emocional o su ayuda práctica, les estoy profundamente agradecida. Su generosidad y amabilidad han hecho posible este logro.*

***Juliana Lucia Pineda Cardozo***

*Este gran logro, con profundo cariño lo dedico a mi madre, mi fuente de amor incondicional, por su paciencia y apoyo a lo largo de mi vida. Su sacrificio y dedicación han sido fundamentales para brindarme estabilidad y permitirme culminar mi etapa universitaria.*

*A mi abuela, por su gran apoyo, por guiarme con sus enseñanzas y consejos de sabiduría, por enseñarme que siempre había un motivo para seguir adelante. Su amor y presencia han sido un regalo invaluable que guardaré por siempre en mi corazón.*

*A mi hermana, le dedico este logro con alegría y agradecimiento. Por mantener en mí la fuerza y convicción de seguir luchando por mis sueños. Gracias por ser mi motivación y ejemplo constante.*

*A Silvia, le dedico este logro con profunda gratitud, por brindarme un apoyo incondicional y cariño sincero en esta etapa. Gracias por haber estado a mi lado en los momentos más difíciles y haber sido mi sostén cuando más lo necesitaba. Que Dios te bendiga siempre.*

***Sergio Andres Jimenez Buitrago***

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento hacia nuestro director, Hans Garcia por su generoso aporte de tiempo, valiosos consejos, enseñanza y constante acompañamiento a lo largo del proyecto. Agradecemos especialmente por brindarnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto de grado dentro del grupo de investigación HDSP.

A nuestro codirector Pablo gomez, por sus recomendaciones, su infinita paciencia, su poyo incondicional y su inquebrantable acompañamiento.

A los integrantes del grupo de investigación, Liney, Sebastian, David, por su apoyo y amabilidad.

A Luis y todos aquellos que contribuyeron en la elaboración de este proyecto. Su colaboración fue fundamental para el éxito de este proyecto. ¡Mil gracias!

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>17</b>
<b>1 Objetivos</b>	<b>22</b>
1.1 Objetivo General	22
1.2 Objetivos Específicos	22
<b>2 Marco teórico</b>	<b>23</b>
2.1 Generalidades	23
2.2 Partes de una banda transportadora	24
2.2.1 Polea	25
2.2.2 Motor	26
2.2.3 Superficie de la banda transportadora	29
2.2.4 Rodillos	32
2.2.4.1 Tipos de rodillos	32
2.2.5 Chumaceras	34
2.3 Control y automatización	34
2.3.1 Microcontroladores y placas de desarrollo	35
2.3.2 Controlador	37
2.4 Deep Learning	43

2.4.1	Algoritmos de detección de imágenes	43
<b>3</b>	<b>Diseño de banda transportadora</b>	<b>48</b>
3.1	Consideraciones iniciales y requisitos de diseño	48
3.2	Primer etapa de diseño	49
3.3	Segunda etapa de diseño	53
3.4	Tercera etapa de diseño	54
3.5	Presentación final del diseño de prototipo de banda transportadora	58
<b>4</b>	<b>Construcción de banda transportadora</b>	<b>60</b>
4.1	Componentes electromecánicos empleados	60
4.2	Caracterización de componentes	64
4.2.1	Motor Paso a Paso NEMA 17	65
4.3	Construcción de la banda transportadora	65
4.4	Construcción de la estructura para la cámara	81
4.5	Ensamble final de la banda transportadora	84
<b>5</b>	<b>Adquisición de la base de datos</b>	<b>85</b>
5.1	Configuración de cámaras para la base de datos	86
5.2	Pruebas de posicionamiento de la cámara	86
5.3	Selección de cámara	87
5.4	Creación de la base de datos	88

5.4.1	Extracción de fotogramas y preparación de datos	88
5.4.2	Etiquetado de imágenes	89
<b>6</b>	<b>Implementación y resultados del algoritmo YOLO</b>	<b>91</b>
6.1	Selección del modelo de aprendizaje automático	91
6.2	Evaluación de desempeño y viabilidad	94
6.3	Implementación del algoritmo	102
6.4	Análisis de resultados	102
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>109</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>112</b>
	<b>Apéndice</b>	<b>116</b>

### Lista de Figuras

Figura 1	Principales zonas de producción de cítricos en Colombia	18
Figura 2	Banda transportadora	24
Figura 3	Partes de una banda transportadora	25
Figura 4	Partes de un motor eléctrico	27
Figura 5	Distribución de rodillos en una banda transportadora	32
Figura 6	Controlador A4988	39
Figura 7	Controlador DRV8825	40
Figura 8	Driver TB6600	41
Figura 9	Tipos de sistema de conexión del driver TB6600 entre cátodo común y ánodo común	42
Figura 10	Arquitectura SSD	45
Figura 11	Arquitectura R-CNN	46
Figura 12	Arquitectura YOLO	47
Figura 13	Diseño y ubicación de chumaceras sobre la superficie de madera	50
Figura 14	Diseño de tambor motriz y tambor retorno	51
Figura 15	Vista general y planos de la banda transportadora	52
Figura 16	Diseño de bases en 3D para soporte de la banda transportadora	53

Figura 17	Diseño para la estructura de la cámara	55
Figura 18	Diseño de Bisagras para unir cada perfil de la cámara	56
Figura 19	Soporte superior e inferior para la estructura de la cámara	57
Figura 20	Diseño integral de la estructura de la cámara	58
Figura 21	Presentación final de banda transportadora	59
Figura 22	Motor Paso a Paso NEMA 17	61
Figura 23	Diagrama de conexión entre la placa de desarrollo, controlador, motor y convertidor de voltaje.	64
Figura 24	Caracterización motor Paso a Paso NEMA 17	65
Figura 25	Proceso de ensamblaje inicia de la banda transportadoara	67
Figura 26	Problema de pandeo en la banda transportadora	68
Figura 27	Prototipo de estructura de madera para brindar soporte a la banda transportadora	69
Figura 28	Ensamble del primer prototipo de la estructura de soporte junto a la banda transportadora	70
Figura 29	Identificación del tambor motriz y de retorno en la banda transportadora	71
Figura 30	Exploración de distintas soluciones para el movimiento constante de productos cítricos en la banda transportadora.	72
Figura 31	Pruebas con diferentes tamaños de malla en busca de la configuración más efectiva	73
Figura 32	Ajuste de una nueva tela con superficie de malla	74

Figura 33	Incorporación de listones para mitigar movimiento en la banda transportadora	75
Figura 34	Diseño y construcción de listones para una nueva versión de la banda transportadora.	76
Figura 35	Prototipo final de la superficie de la banda transportadora.	77
Figura 36	Detección de problemas de roce entre la banda y la impresión 3D	78
Figura 37	Implementación final de las bases en 3D	79
Figura 38	Construcción de la estructura final para evitar el pandeo de la banda transportadora	80
Figura 39	Representación final de la banda transportadora	81
Figura 40	Prototipo para la estructura de la cámara	82
Figura 41	Bisagras y estructura superior impresas en 3D	83
Figura 42	Diseño final de la estructura para la cámara	83
Figura 43	Ensamble final de la banda transportadora	84
Figura 44	Prototipo de estructura para hacer pruebas de posicionamiento de la cámara	87
Figura 45	Visualización del etiquetado de imágenes entre limones y mandarinas	90
Figura 46	Comparativa del rendimiento entre los diferentes modelos de YOLO	92
Figura 47	Comparativa del modelo entre las diferentes versiones de YOLO	94
Figura 48	Análisis de pérdida y rendimiento con configuración óptima de hiperparametros	100
Figura 49	Matriz de confusión para los datos de validación	104
Figura 50	Matriz de confusión para los datos de prueba	106

Figura 51 Visualización del proceso de identificación y clasificación de productos cítricos en imágenes de tanto validación y prueba.

108

**Lista de Tablas**

Tabla 1	Partes de una banda transportadora	25
Tabla 2	Tipos de Polea	26
Tabla 3	Comparación de Ventajas y Desventajas de Diferentes Tipos de Motores	28
Tabla 4	Tipos de superficie de bandas transportadora	31
Tabla 5	Tipos de rodillos	33
Tabla 6	Tipos de Chumaceras	34
Tabla 7	Tipos de microcontroladores	37
Tabla 8	Los desafíos mas comunes en la visión artificial	43
Tabla 9	Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 2	95
Tabla 10	Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 4	95
Tabla 11	Tabla de resultados para Batch 8	96
Tabla 12	Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 16	97
Tabla 13	Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 32	98
Tabla 14	Mejores resultados de cada tabla de Batch	98
Tabla 15	Definición de hiperparámetros para YOLOV5	99
Tabla 16	Comparación de rendimiento entre modelos YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOV5x	101
Tabla 17	Selección de parámetros para el entrenamiento del modelo YOLO	102
Tabla 18	Análisis de desempeño de validación del modelo	103

Tabla 19 Análisis de desempeño de prueba del modelo

105

### **Lista de Apéndices**

Apéndice A	Código de control del motor paso a paso	116
Apéndice B	Diseño de los componentes en 3D	116
Apéndice C	Implementación de código para el algoritmo de YOLOv5.	116

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de un prototipo de banda transportadora para la identificación automática de productos cítricos mediante inteligencia artificial. \*

**Autores:** Juliana Lucia Pineda Cardozo, Sergio Andrés Jiménez Buitrago. \*\*

**Palabras clave:** Automatización, Identificación, Clasificación, Frutas cítricas, Eficiencia, Banda transportadora, Algoritmo YOLOv5.

**Descripción:** El proyecto aborda la importancia de implementar sistemas automatizados para la identificación y clasificación de productos agrícolas, como frutas cítricas, en diversos contextos industriales y agrícolas. Estos sistemas ofrecen la oportunidad de mejorar la eficiencia, precisión y rentabilidad en procesos de recolección, clasificación y embalaje de productos, al tiempo que reducen la dependencia de la mano de obra humana y minimizan los errores asociados con tareas manuales. Sin embargo, el estado del arte presenta ciertas limitaciones, como la falta de sistemas integrados y escalables que puedan adaptarse fácilmente a diferentes condiciones ambientales y tipos de productos. Además, muchos de los sistemas existentes pueden enfrentar dificultades para lidiar con variaciones en la apariencia de los productos debido a factores como la iluminación, el fondo y la orientación, lo que puede afectar negativamente la precisión y confiabilidad de la identificación y clasificación.

En este contexto, se desarrolló una metodología integral para la construcción e implementación de una banda transportadora automatizada destinada a la identificación y clasificación de frutas cítricas, específicamente limones y mandarinas. Esta metodología incluyó la construcción de la banda transportadora, la creación de una base de datos de imágenes etiquetadas y la implementación del algoritmo de detección de objetos YOLOv5 para la identificación precisa de frutas cítricas en las imágenes capturadas por el sistema.

La implementación del sistema de banda transportadora, junto con una cámara para la adquisición de video y el algoritmo YOLOv5 logró una precisión destacada, con una tasa de acierto de 0.9945. Estos resultados demuestran la viabilidad y eficacia de nuestro enfoque para la identificación y clasificación automatizada de frutas cítricas en entornos industriales y agrícolas. El proyecto representa un paso significativo hacia la mejora de los procesos de manejo de productos agrícolas, ofreciendo soluciones innovadoras y escalables para las demandas del mundo real.

---

\* Trabajo de Grado: Diseño e implementación de un prototipo de banda transportadora para la identificación automática de productos cítricos mediante inteligencia artificial.

\*\* Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Hans Yecid Garcia Arenas. Codirector: Henry Arguello Fuentes. Codirector: Pablo Andres Gomez Toloza

### Abstract

**Title:** Design and Implementation of a Conveyor Belt Prototype for Automatic Identification of Citrus Products Using Artificial Intelligence. \*

**Authors:** Juliana Lucia Pineda Cardozo, Sergio Andrés Jiménez Buitrago. \*\*

**Keywords:** Neural Citrus fruit, object detection, YOLOv5, conveyor belt, machine learning.

**Description:** The project addresses the importance of implementing automated systems for the identification and classification of agricultural products, such as citrus fruits, in various industrial and agricultural contexts. These systems offer the opportunity to enhance efficiency, accuracy, and profitability in processes of harvesting, sorting, and packaging products, while reducing dependence on human labor and minimizing errors associated with manual tasks. However, the state of the art presents certain limitations, such as the lack of integrated and scalable systems that can easily adapt to different environmental conditions and types of products. Additionally, many of the existing systems may face challenges in dealing with variations in the appearance of products due to factors such as lighting, background, and orientation, which can negatively affect the accuracy and reliability of identification and classification.

In this context, a comprehensive methodology was developed for the construction and implementation of an automated conveyor belt designed for the identification and classification of citrus fruits, specifically lemons and mandarins. This methodology included the construction of the conveyor belt, the creation of a database of labeled images, and the implementation of the YOLOv5 object detection algorithm for the accurate identification of citrus fruits in images captured by the system.

The implementation of the conveyor belt system, along with a camera for video acquisition and the YOLOv5 algorithm, achieved outstanding accuracy, with a success rate of 0.9945. These results demonstrate the viability and effectiveness of our approach for automated identification and classification of citrus fruits in industrial and agricultural environments. The project represents a significant step towards improving agricultural product handling processes, offering innovative and scalable solutions for real-world demands.

---

\* Undergrad Work

\*\* Faculty of Engineering Physicomechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: Hans Yecid Garcia Arenas; Co-Advisor: SHenry Arguello Fuentes; Co-Advisor: Pablo Andres Gomez Toloza

## Introducción

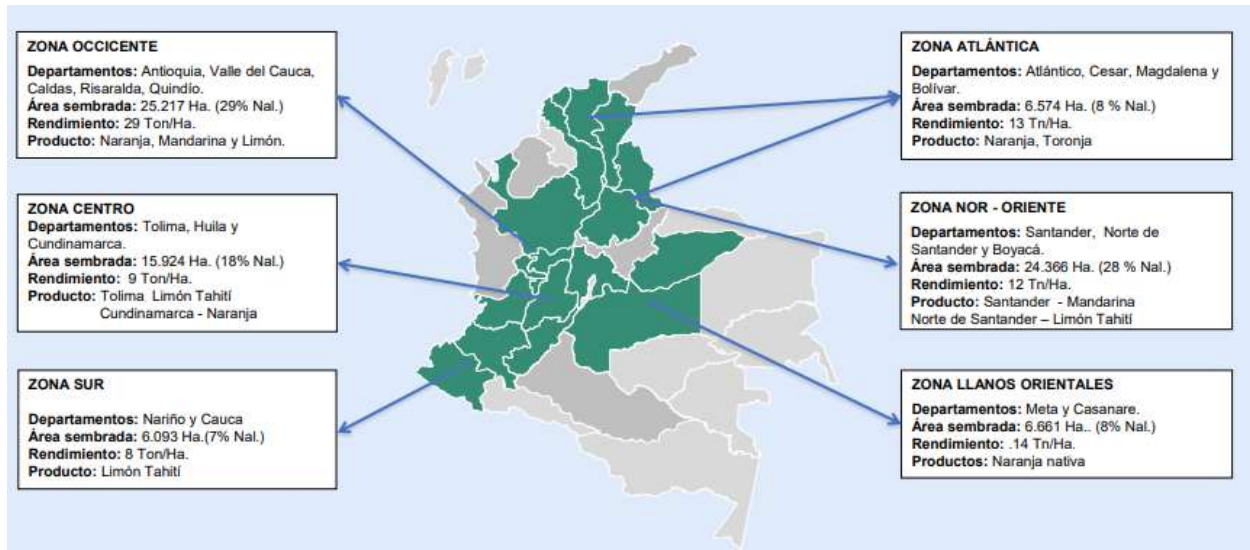
En Colombia, en los últimos años, las exportaciones de productos cítricos han experimentado un aumento, ya que la agricultura colombiana exhibe una diversa y amplia gama de cultivos que se benefician de la gran variedad de pisos térmicos del país (Arias y Suarez, 2016). Estas condiciones proporcionan un entorno óptimo para el cultivo de productos. Además, la diversidad de cultivos ha sido un factor fundamental en el crecimiento de las exportaciones que se ha potenciado por la firma de acuerdos comerciales con diferentes países principalmente Chile, Francia, Estados Unidos, los cuales representan alianzas que facilitan el acceso a nuevos mercados contribuyendo en la reducción de las barreras arancelarias (potencia de la vida, 2021). De acuerdo con un estudio realizado por ProColombia, en los meses entre enero y agosto de 2021, las exportaciones colombianas de cítricos a Estados Unidos ascendieron a US\$ 13,3 millones, lo que representó un crecimiento del 267% (US\$ 9,7 millones) con respecto al mismo periodo del año anterior, cuando se exportaron US\$ 3,6 millones (Procolombia, 2021)

Entre los cítricos más relevantes se destacan las naranjas, limones, mandarinas y toronjas, estos productos son un componente esencial en la producción agrícola del país, apreciados tanto por su sabor como por su valor nutricional. Los productos cítricos son cultivados en diferentes regiones del país, desde las tierras altas de la región Andina hasta las zonas más cálidas de la cos-

ta caribeña (Figura 1). En este contexto, es relevante resaltar que el departamento administrativo nacional de estadística informa que el 35.1 % de 8.5 millones de hectáreas son cultivos agroindustriales (Instituto Nacional de Contadores Públicos de Colombia, 2021).

*Figura 1.*

Principales zonas de producción de cítricos en Colombia.



*Nota.* Representación de las áreas geográficas principales para la producción de cítricos en Colombia. Adaptado de: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *CADENA DEL CÍTRICOS Indicadores e instrumentos*. Pagina web, <https://towardsdatascience.com/comprehensive-introduction-to-neural-network-architecture-c08c6d8e5d98>

Las estadísticas presentes en la Figura 1) no solo reflejan un aumento en la demanda, sino también la impresionante resiliencia y adaptabilidad de nuestra industria agrícola. La elección de los cítricos va más allá de la simple apreciación visual, pues integra criterios que han guiado a generaciones de campesinos. En este cruce entre lo tradicional y lo innovador, nuestra propuesta adquiere significado, donde se propone el diseño e implementación de un prototipo de banda trans-

portadora, haciendo uso de algoritmos de inteligencia artificial para la identificación automática de productos cítricos. Este enfoque tiene el potencial de transformar no solo la eficiencia y calidad de la producción de cítricos, sino también de impactar positivamente en la economía agrícola nacional. La automatización de la identificación de productos cítricos no solo optimizará los procesos de selección, sino que también abrirá nuevas oportunidades para la expansión del mercado y la competitividad internacional.

La aplicación de esta tecnología ayudará atraer no solo a inversionistas interesados en el sector agrícola, sino también a aquellos que buscan participar en la vanguardia de la innovación tecnológica con impactos significativos en la agricultura. Este enfoque en la modernización se ve materializado con la implementación del prototipo de banda transportadora con inteligencia artificial para identificar productos cítricos, el cual no solo mejorará la productividad, sino que también posicionará a Colombia como un referente en la adopción de tecnologías en la industria agrícola, trascendiendo las fronteras convencionales y abriendo nuevas oportunidades de inversión con proyección global.

En este contexto de la innovación y eficiencia, la inteligencia artificial emerge como una herramienta que ofrece una variedad de posibilidades para abordar los desafíos en la agricultura. Al integrar algoritmos de inteligencia artificial en nuestro proyecto, no solo estamos automatizando tareas que antes requerían tiempo y recursos humanos, sino que también estamos transformando la forma en la que se llevan a cabo algunas tareas agrícolas. Esta técnica, mediante su aprendizaje automático y procesamiento de datos, nos permite analizar conjuntos de datos con gran velocidad y

precisión. Esto se logra a través de la identificación de patrones que el algoritmo aprende a medida que procesa los datos, permitiendo la toma de decisiones.

Además, la inteligencia artificial tiene la capacidad de aprender y adaptarse continuamente a medida que se exponen a más datos y experiencias. Esto significa que nuestros sistemas pueden mejorar con el tiempo, refinando sus algoritmos y procesos para lograr resultados aún más óptimos.

EL presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño e implementación de un prototipo de banda transportadora para la identificación automática de productos cítricos, empleando procesamiento de imágenes mediante algoritmos de inteligencia artificial. Para lograr este propósito, se ha estructurado el documento en seis capítulos que plantean de manera progresiva los fundamentos y el desarrollo del proyecto.

En el primer capítulo se establecen tanto el objetivo general como los objetivos específicos. Seguidamente, en el segundo capítulo se abordan las características de las bandas transportadoras. Se detallan los componentes que integran este sistema, se analiza su rol en el funcionamiento, se explora los diversos tipos de componentes disponibles en el mercado, se hace una distinción entre microcontrolador y controlador presentando los distintos dispositivos más adecuados para nuestro proyecto y finalmente se examina los diferentes modelos para la identificación de objetos.

El capítulo tres y cuatro están estrechamente relacionados, ya que el proceso de diseño y construcción de la banda transportadora se desarrolla de manera paralela. Se describe cómo los errores detectados durante la construcción retroalimentan el proceso de diseño, generando un ciclo

iterativo hasta alcanzar la versión final del proyecto.

El capítulo cinco se describe la adquisición de la base de datos necesaria para el entrenamiento del modelo de inteligencia artificial. Se detallan los procedimientos para la recolección de datos, el tipo de productos cítricos seleccionado y la cantidad de productos usados, así como las herramientas y métodos empleados para el proceso de etiquetado de las imágenes.

El capítulo seis y último capítulo presenta la etapa de validar el rendimiento del algoritmo de inteligencia artificial, donde se experimenta con diferentes configuraciones de hiperparámetros y se realizan pruebas para determinar el modelo más eficiente. Finalmente se muestran los resultados obtenidos durante las etapas de entrenamiento y validación, concluyendo con la exposición del mejor modelo y sus resultados finales.

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de banda transportadora para la identificación automática de productos cítricos, empleando procesamiento de imágenes mediante algoritmos de inteligencia artificial.

### 1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un prototipo de banda transportadora que permita un control de velocidad en el desplazamiento de los productos cítricos.
- Construir la banda transportadora diseñada empleando los elementos electromecánicos provistos por el grupo de investigación HDSP.
- Adquirir una base de datos de imágenes de cítricos que permita realizar el entrenamiento de un algoritmo de identificación basado en inteligencia artificial.
- Validar el rendimiento del algoritmo de inteligencia artificial en imágenes capturadas mediante el sistema de banda transportadora construido.

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Generalidades**

En la agricultura, hay ciertos aspectos que inciden directamente en la calidad y el precio del producto. Elementos como el manejo del producto, la maduración, el color, rugosidad, tamaño, son algunos de ellos. Tradicionalmente, la separación de los productos se ha realizado de forma manual. Esta práctica, si bien permite realizar una selección precisa, también puede llegar a ser tediosa. En el caso de los de los frutos como la mandarina y naranja, la detección y clasificación manual se centra de acuerdo al tamaño, la coloración y textura, siendo características que determinan su valor comercial.

En la industria, la eficiencia en el transporte de productos es fundamental para mantener un flujo constante de las operaciones. En respuesta a esta necesidad, en el mercado actualmente existen diversas soluciones que permiten a las empresas optimizar sus procesos de distribución. Entre las soluciones se destacan las bandas transportadoras, que se caracterizan por ser un sistema versátil, que se adapta a una variedad de tamaños, tipos de materiales y productos, con una gran capacidad de transporte. Este sistema consiste en una superficie continua, generalmente de caucho, que se desplaza sobre rodillos permitiendo el movimiento de un punto a otro.

En el mercado se encuentran diferentes diseños y tipos de bandas transportadoras que se adaptan a los requisitos de cada producto y proceso que se desea ejecutar (Figura 3). La inclinación, velocidad, dirección y control del flujo de materiales son algunas de las configuraciones que se pueden integrar.

*Figura 2.*  
Banda transportadora.



*Nota.* Representación de una banda transportadora industrial. Adaptado de: Transportadores de cable. <https://cablevey.com/es/cuales-son-los-diferentes-tipos-de-transportadores/>

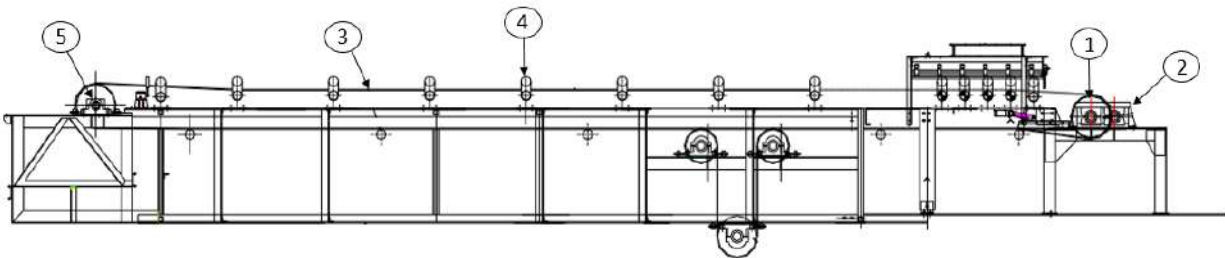
## 2.2. Partes de una banda transportadora

Para comprender el correcto funcionamiento de una banda transportadora es indispensable familiarizarse con sus diferentes componentes que se representan en la Tabla 1. Cada componente cumple un papel específico en el funcionamiento global del sistema (Figura 3).

Tabla 1

*Partes de una banda transportadora*

Partes de una banda transportadora
1. Polea
2. Motor
3. Superficie
4. Rodillos
5. Chumaceras

*Figura 3.**Partes de una banda transportadora.*

*Nota.* Representación de los principales componentes que intervienen en el funcionamiento óptimo de una banda transportadora. Adaptado de: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021).

### **2.2.1. Polea**

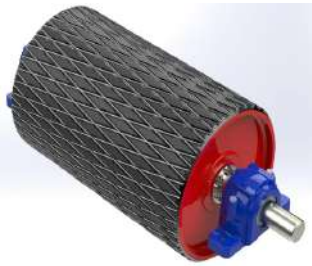

Son elementos cilíndricos conectados al sistema de potencia en una banda transportadora. Su función principal es generar el movimiento de la cinta, ya sea mediante fricción directa o a través de un sistema de cadenas. Las poleas se dividen comúnmente en dos tipos, de acuerdo a su función:

- Polea motriz: La polea motriz representada en la tabla 2, conectada de manera directa al

motor del sistema, es la encargada de iniciar y mantener el movimiento de la banda transportadora.

- **Polea de Retorno:** Está ubicada en el lado opuesto de la banda y facilita el retorno de la misma a su posición inicial después del transporte de los materiales. su representación se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2  
*Tipos de Polea*

Polea motriz	Polea retorno
	

### 2.2.2. Motor

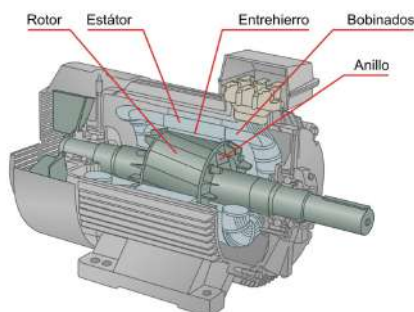
Un motor eléctrico es un dispositivo electromecánico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Se utiliza en diversas aplicaciones, como bombas para elevadores de agua, ascensores hidráulicos, portones automáticos (Farina, 2018).

Los motores eléctricos están conformados por dos elementos esenciales: El estator y el rotor. El estator es la parte fija del motor, compuesta por bobinas de alambre ubicadas alrededor

de un núcleo ferromagnético. Por otro lado, el rotor es la parte móvil del motor, que se encuentra dentro del estator y está montado sobre un eje.

*Figura 4.*

Partes de un motor eléctrico



*Nota.* Partes principales de un motor eléctrico. Tomado de: Componentes y frecuencias de interés. (2017, 11 octubre). Power-MI. <https://power-mi.com/es/content/componentes-y-frecuencias-de-interés>

Los motores eléctricos se clasifican según el tipo de corriente que los alimenta:

- Motores de corriente continua (CC): Son equipos electromecánicos diseñados para operar con corriente directa, se caracterizan por su capacidad de controlar tanto la velocidad como la dirección.(ROLDÁN VILORIA, 2014)
- Motores de corriente alterna (CA): Son equipos electromecánicos que operan con corriente alterna. Una de sus características es la capacidad para variar la velocidad de operación en función de la frecuencia de la corriente alterna. (Fernández, 2018)
- Motores síncronos: Son un tipo especial de motor de corriente alterna, se caracterizan por

mantener una velocidad de rotación sincronizada con la frecuencia de la corriente alterna que los alimenta.(Nistal, 2014)

- Motores asíncronos: Es otro tipo de motor de corriente alterna. Los motores asíncronos presentan una velocidad de rotación del rotor que no está sincronizada con la frecuencia de la corriente alterna que lo alimenta.

La tabla 3 refleja una detallada comparación de las ventajas y desventajas de los motores, ofreciendo una visión de las distintas características.

Tabla 3

*Comparación de Ventajas y Desventajas de Diferentes Tipos de Motores*

<b>Tipo de Motor</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Motor DC	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Permite un arranque suave</li> <li>■ Es de tamaño compacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Limitaciones de velocidad</li> <li>■ Es de costo elevado</li> </ul>
Motor AC	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ofrece altas velocidades</li> <li>■ Mayor seguridad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mayor control de velocidad</li> <li>■ Menor par de arranque</li> </ul>
Motor síncrono	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Buena eficiencia energética</li> <li>■ Excelente control de velocidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Menor par de arranque</li> <li>■ Es de costo elevado</li> </ul>
Motor asíncrono	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Alto par de arranque</li> <li>■ Realiza arranques directos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Menor eficiencia energética</li> <li>■ Control de velocidad limitado</li> </ul>

### ***2.2.3. Superficie de la banda transportadora***

La superficie de la banda es un componente mecánico elaborado con materiales duraderos y resistentes, tales como caucho, PVC, poliuretano, entre otros. Su diseño puede variar en el grosor, tejido y tipo de superficie según las necesidades específicas del transporte de los materiales (Guzmán, 2023). Asimismo, para asegurar un funcionamiento óptimo, es necesario cumplir con las siguientes funciones:

- **Resistencia al desgaste:** Los cítricos, especialmente los limones, naranjas y mandarinas, presentan una piel con textura rugosa. Esta textura, al estar en constante roce con la banda transportadora, genera un desgaste en la superficie.
- **Adaptabilidad a entornos diversos:** La banda debe resistir a la humedad y al agua para evitar su degradación.
- **Soportar el peso de los materiales transportados:** La banda transportadora debe ser diseñada para soportar cargas variables asegurando un transporte eficiente.

Existen una variedad de tipos de superficie de banda transportadora diseñadas para adaptarse a diversas necesidades y aplicaciones industriales. Estas superficies se pueden clasificar:

#### **1. Según el tipo de tejido**

- **Algodón:** Es adecuado cuando se requiere cuidado en el transporte del material. Sin

embargo, tiene la desventaja de que son fáciles de descomponerse.

- **Poliéster:** Es un material conocido por su resistencia y durabilidad. Adecuado para aplicaciones que involucren material de gran peso.
- **Nylon:** Es un material sintético ampliamente utilizado en aplicaciones que requieran resistencia a materiales químicos y a la humedad.

## **2. Según el tipo de superficie**

- **Lisa:** Superficie lisa sin patrones o texturas significativas, adecuada para transportar una variedad de materiales.
- **Nervada:** La superficie de esta banda tiene patrones en forma de V. Cada patrón puede tener diferentes alturas.
- **Modulares:** La superficie de esta banda consiste en módulos interconectados para facilitar la transferencia y manipulación de productos en sistemas de transporte complejos.
- **Rodillos:** La superficie contiene pequeños rodillos, diseñados para reducir la fricción y facilitar el transporte de cargas pesadas.
- **Malla:** La superficie está compuesta por perforaciones, permitiendo una excelente ventilación y drenaje.

- Liston: La superficie está compuesta por una serie de barras colocadas de manera paralela, espaciadas uniformemente.

La tabla 4, presenta los distintos tipos de superficie de las bandas transportadoras, cada una diseñada para cumplir con necesidades específicas.

Tabla 4

*Tipos de superficie de bandas transportadora*

Lisa	Nervada	Modular
		
Rodillos	Malla	Liston
		

### 2.2.4. Rodillos

Los rodillos son cilindros que forman parte de la estructura de soporte de la banda transportadora, presentando un contacto directo con el material de la cinta. Suelen estar ubicados a lo largo de toda la estructura (Figura 5) y unidos mecánicamente a los rodamientos, los cuales son componentes que permiten realizar un giro libre.

*Figura 5.*

Distribución de rodillos en una banda transportadora









*Nota.* Distribución de rodillos en una banda transportadora para soportar el peso de los objetos transportados. Tomado de: Canny, R. (2023, 21 noviembre). Transportador por gravedad. Transportador de rodillos. Ultimation. <https://www.ultimationinc.com/es/sistemas-de-transporte-industrial/transportador-de-rodillos/>

#### 2.2.4.1. Tipos de rodillos.

- Rodillos cilíndricos de banda lisa: Diseñados para brindar soporte a la parte inferior de la banda transportadora.
- Rodillos de impacto: Diseñados para cargas pesadas, se encargan de absorber los choques y proteger la banda.

- Rodillos con eje motor: Diseñados para generar movimiento, ya que cuentan con un motor incorporado en su eje.
- Un solo rodillo: Pueden estar distribuidos a lo largo de toda la banda actuando como soporte y guía.
- Rodillos en V: Crean una estructura en la que la banda transportadora estará apoyada sobre múltiples rodillos.
- Rodillos en catenaria: Permiten que la banda se ajuste de manera flexible, evitando tensiones excesivas.

Tabla 5  
Tipos de rodillos

Rodillo liso	Rodillos de impacto	Rodillos con eje motor
		
Un solo rodillo	Rodillos en V	Rodillo en catenaria
		

### 2.2.5. Chumaceras

También conocidas como rodamientos, son un dispositivo mecánico que se utilizan para brindar soporte a los ejes de los rodillos en una banda transportadora. Estos elementos están orientados a reducir la fricción entre los rodillos y la superficie de la banda, facilitando el transporte de los materiales.(Macaplast, 2023). En la tabla 6, se presentan los principales tipos de chumaceras, las cuales desempeñan la misma función pero están diseñadas para adaptarse a las condiciones específicas de instalación.

Tabla 6  
*Tipos de Chumaceras*

Tensora	Pared	Pedestal
		

### 2.3. Control y automatización

La eficiencia en el funcionamiento de una banda transportadora depende en gran parte del sistema de control y automatización. Este sistema se encarga de supervisar y gestionar el funcionamiento de manera óptima, permitiendo un movimiento preciso y coordinado entre los componentes

mecánicos y electrónicos.

Para comprender mejor el funcionamiento de los sistemas de control y automatización, es fundamental conocer los componentes involucrados:

### ***2.3.1. Microcontroladores y placas de desarrollo***

Un microcontrolador (MCU) es un dispositivo programable que se encarga de procesar información, ejecutar algoritmos de control y enviar comandos a otros dispositivos conectados. Está compuesto por un procesador, memoria y varios periféricos. La memoria se utiliza para almacenar el programa con el que se ejecutará una tarea programada, así como el firmware que sirve de interfaz entre el microcontrolador y los controladores de los motores. (Valdés y Areny, 2007). Por otro lado, las placas de desarrollo proporcionan un entorno de hardware y software integrados facilitando la creación de proyectos, por lo general cuentan con periféricos USB (Castro *et al.*, 2011).

Todos los microcontroladores como las diversas placas de desarrollo se pueden clasificar en diversos tipos, cada uno con características distintas que los hacen adecuados para variedad de aplicaciones. algunos de los modelos que se destacan en el mercado son:





- **Arduino:** Es un microcontrolador de código abierto que se compone de dos elementos: el software y hardware. El hardware se materializa en la placa de desarrollo Arduino, mientras que el software proporciona un entorno de desarrollo integrado que facilita la escritura y

carga de código a la placa. Estas placas están diseñadas con microcontroladores ATMEL de 8 o 32 bits (Ismailov *et al.*, 2022).

- **Raspberry:** Es un ordenador de placa reducida desarrollado en Reino Unido por la fundación Raspberry PI, tenía el propósito de ser un pequeño computador para enseñar a alumnos de últimos grados de bachiller a programar (ras, 2007). Raspberry es un ordenador que utiliza un microcontrolador con arquitectura ARM (Advanced Risc Machine), memoria RAM y tarjeta gráfica o GPU (Graphics processing units) todo esto en un solo chip.
- **ESP32:** Es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento. Se caracteriza por su potencia de procesamiento, conectividad WIFI y el modo dual con Bluetooth. Cuenta con una variedad de puertos de conexión incluyendo GPIO, I2C, ADC,DAC. En cuanto al software, dispone de un entorno de desarrollo basado en framework de Arduino (Babiuch *et al.*, 2019).
- **Nvidia Jetson Nano:** La Jetson Nano, cuenta con 4 puertos USB, HDMI, DisplayPort y Gigabit Ethernet, así como puertos SDIO, I2C, SPI. Además, incluye un conector M.2 para una interfaz WIFI, (Vazquez, 2023). Esta variedad de conectores proporciona flexibilidad para ampliar las capacidades del dispositivo de acuerdo a las requerimientos del proyecto. En cuanto al software, la Jetson Nano es compatible con los frameworks de Inteligencia Artificial, como Keras, PyTorch, TensorFlow, Caffe y MXNET (Vazquez, 2023).

La tabla 7, ofrece una representación visual de los microcontroladores mas populares:

Tabla 7  
*Tipos de microcontroladores*

Arduino	Raspberry
	
ESP32	Nvidia Jetson Nano
	

### 2.3.2. Controlador

A diferencia de un microcontrolador, que es un dispositivo programable con capacidad de procesar información, controlar y ejecutar tareas. Un controlador es un componente de hardware que se utiliza para realizar funciones específicas. Por ejemplo, controlar dispositivos como sensores, actuadores, motores. En el caso de los motores paso a paso su funcionamiento se basa en transformar las señales de pulso en movimientos físicos (Khairudin *et al.*, 2020).

Existen diversos tipos de controladores con características y funcionalidades específicas para adaptarse a diferentes aplicaciones. Algunos de los más comunes son:

- **A4988:** Es un controlador diseñado para motores paso a paso bipolares. Utilizando la técnica de microstepping<sup>1</sup>, dividen los pasos del motor que usualmente trabajan a 1.8° o 200 pasos por revolución en seis resoluciones diferentes: paso completo, (1/2) paso, (1/4) paso, (1/8) paso y (1/16) de paso, lo que permite un control más preciso (García, arzo). En cuanto a su funcionamiento, el controlador requiere un voltaje de entrada de 3 a 5.5 (V) y tiene una capacidad de accionamiento de salida de hasta 35 (V) y  $\pm 2$  (A). Cada pulso enviado por el microprocesador a la entrada STEP<sup>2</sup> corresponde a un microstep, mientras que la dirección del movimiento será determinada de acuerdo al pin DIR<sup>3</sup>. El A4988 es comúnmente usado en proyectos de impresoras 3D, robótica y proyectos de automatización. Su versatilidad y precisión lo hacen ideal para sistemas que requieren un control preciso.

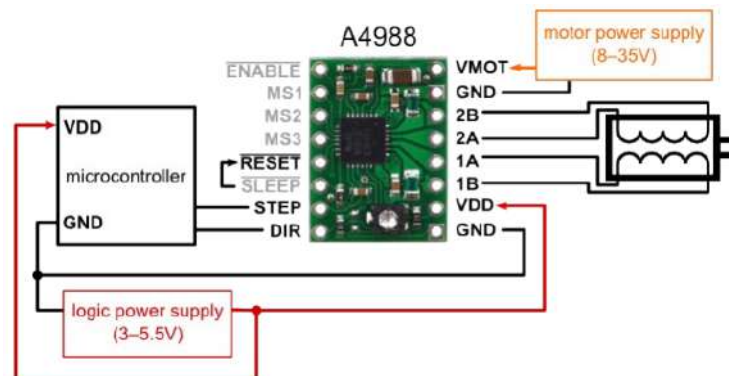
---

<sup>1</sup> El microstepping es una técnica de motores paso a paso, usada con el fin de dividir cada paso de un motor en subpasos más pequeño, permitiendo un movimiento más suave y preciso

<sup>2</sup> STEP, es una de las entradas del controlador que se utiliza para indicar la cantidad de pasos que debe girar el motor, siendo la señal un pulso digital

<sup>3</sup> La entrada DIR, se utiliza para indicar al controlador en que dirección se debe mover el motor. Siendo la señal nivel lógico alto o bajo

Figura 6.  
Controlador A4988

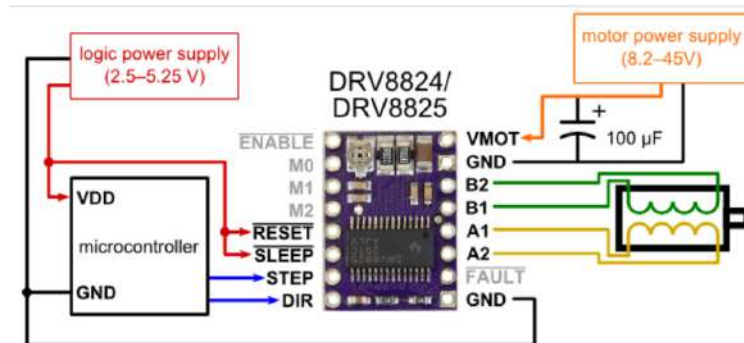


*Nota. Sistema de conexión de un controlador A4988.* Tomado de: Driver Pololu A4988 y su conexión con un motor paso a paso. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Driver-Pololu-A4988-y-su-conexionado-con-un-motor-paso-a-paso-bipolar\\_fig6\\_31269139](https://www.researchgate.net/figure/Driver-Pololu-A4988-y-su-conexionado-con-un-motor-paso-a-paso-bipolar_fig6_31269139)

- **DRV8825:** Es un controlador de motor paso a paso que, al igual que el A4988, utiliza la técnica de microstepping para dividir los pasos del motor en incrementos más pequeños, alcanzado hasta 1/32 micropasos. En cuanto a sus especificaciones, este controlador tiene un rango de voltaje de entrada que va de 8.2 (V) a 45 (V) y una capacidad de corriente de salida de hasta 2.5 (A) por bobina (Texas Instruments, 2014). Al igual que el A4988, el DRV8825 se controla mediante las señales de STEP Y DIR.

Figura 7.

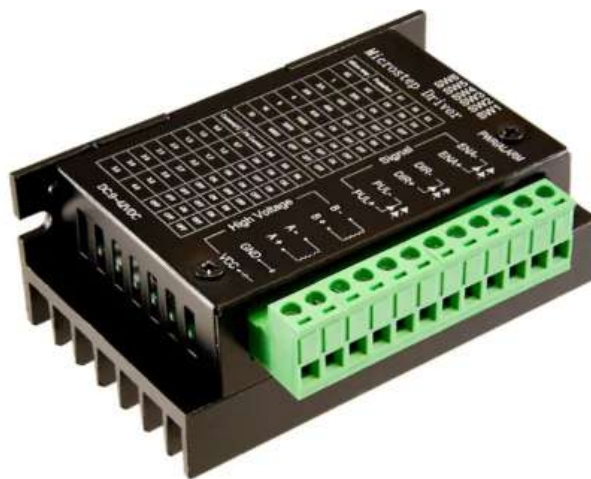
Controlador DRV8825



*Nota. Sistema de conexión de un controlador DRV8825.* Tomado de: Instructables. (2017, 19 septiembre). Controll a Stepper Motor With the DRV8825. Instructables. <https://www.instructables.com/Controll-a-Stepper-Motor-With-the-DRV8825/>

- **TB6600:** Es un controlador de motores paso a paso de dos fases. El TB6600 ofrece siete tipos de configuraciones (1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32) lo que permite adaptar el movimiento del motor a necesidades específicas. En cuanto a la corriente de salida, el controlador permite ajustes desde 0.5 (A) hasta 3.5 (A), con la capacidad de soportar picos de corriente de hasta 4 (A) (Khairudin, 2020). Lo que lo hace ideal para proyectos con motores de alta potencia.

Figura 8.  
Driver TB6600



*Nota. Sistema de conexión de un controlador DRV8825.* Tomado de: Instructables. (2017, 19 septiembre). Control a Stepper Motor With the DRV8825. Instructables. <https://manuals.plus/es/dfrobot/tb6600-stepper-motor-driver-manualixzz8J8QyFZVr>

El controlador TB6600 dispone de tres señales de entrada: señal de pulso de paso (PUL+, PUL-), señal de dirección (DIR+, DIR-) y señal de habilitación (EN+, EN-).<sup>4</sup>

Tanto la conexión del controlador al microcontrolador y motor puede realizarse de dos maneras: mediante la conexión de cátodo común o de ánodo común, esta configuración de conexión depende de los requerimientos del circuito.

- **Conexión cátodo común:** En esta configuración (Figura 9.a), la tierra del microcon-

---

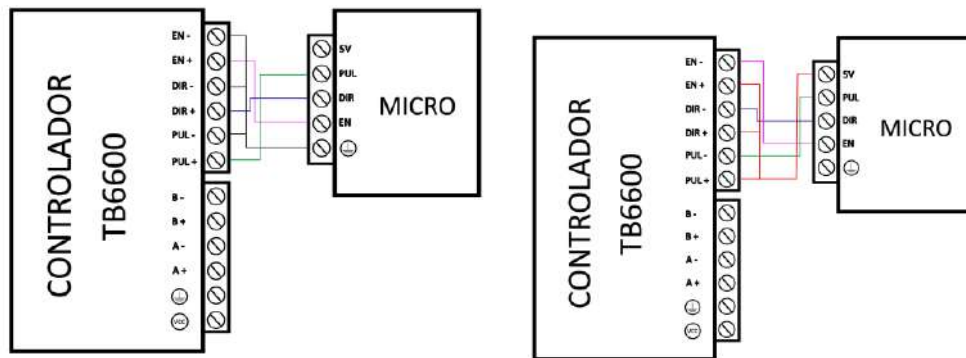
<sup>4</sup> Las entradas de ENABLE + y ENABLE -, se utilizan para habilitar o deshabilitar la energía del motor, permitiendo controlar cuándo el motor está activo y cuándo está en reposo

trolador se conecta a las entradas negativas del controlador (PUL -, DIR -, EN -), mientras que las señales de pulso, dirección y habilitación del microcontrolador se conectan a las entradas positivas correspondientes (PUL +, DIR +, EN +).

- **Conexión ánodo común:** En esta configuración la fuente de alimentación del microcontrolador se conecta a las entradas del controlador (PUL +, DIR+, EN+) tal como se representa en la Figura 9.b, mientras que las señales de pulso, dirección y habilitación del microcontrolador se conectan a las entradas negativas correspondientes (PUL-, DIR-, EN-).

Figura 9.

Tipos de sistema de conexión del driver TB6600 entre cátodo común y ánodo común



(a) Conexión cátodo común

(b) Conexión ánodo común

*Nota.* La figura muestra los dos tipos de configuración disponibles para la conexión del driver al motor.

## 2.4. Deep Learning

El Deep Learning es un subcampo de la inteligencia artificial (IA) que utiliza redes neuronales artificiales (ANN) para aprender de grandes cantidades de datos. Estas ANN se inspiran en la estructura del cerebro humano, con capas de neuronas artificiales que procesan y transmiten información. A medida que las ANN se exponen a más datos, ajustan sus conexiones y pesos internos, lo que les permite aprender y mejorar su rendimiento en una tarea específica.

Los problemas más comunes que surgen en la visión artificial y pueden ser resueltos usando algoritmos de Deep Learning se ilustran en la tabla 8.

Tabla 8

*Los desafíos mas comunes en la visión artificial*

Partes de una banda transportadora
1. Clasificación
2. Detección o localización.
3. Aprendizaje de similitud.
4. Subtitulo de imagen.
5. Modelos Generativos.
6. Análisis de video.

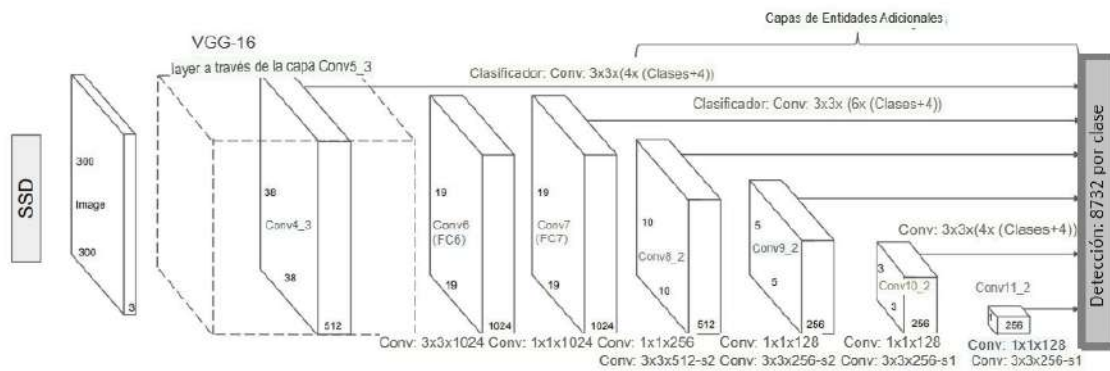
### 2.4.1. Algoritmos de detección de imágenes

La detección de objetos genéricos, también llamada detección de categorías de objetos genéricos, detección de clases de objetos o detección de categorías de objetos (Zhang *et al.*, 2013), se trata de identificar en una imagen la presencia de objetos pertenecientes a diversas categorías predefinidas, con énfasis en localizar y determinar la extensión de cada instancia. Este enfoque

prioriza la detección de una amplia gama de categorías naturales en lugar de centrarse únicamente en categorías específicas. Aunque existen numerosos objetos en nuestro entorno visual, la atención principal de la comunidad investigadora se centra en localizar objetos altamente estructurados y articulados, como rostros, automóviles, seres humanos y animales, en lugar de objetos no estructurados como el cielo o la vegetación (Liu *et al.*, 2020).

1. **Single Shot Detector (SSD):** En este contexto, el detector emplea una arquitectura de red neuronal convolucional piramidal. Esta estructura permite detectar tanto objetos grandes como pequeños al utilizar múltiples capas de detección. Cada una de estas capas genera mapas de características para escalas diferentes. A medida que la red neuronal convolucional avanza reduce gradualmente la dimensión espacial y por ende, la resolución de los mapas. Los mapas de baja resolución se emplean para identificar objetos de mayor tamaño, mientras que los de alta resolución se utilizan para objetos más pequeños. En la arquitectura de la red SSD (Single Shot Multibox Detector), representada en la Figura 10, se hace uso de la red VGG16 para extraer características, y a través de capas de convolución se llevan a cabo las detecciones (Hui, 2018).

Figura 10.  
Arquitectura SSD

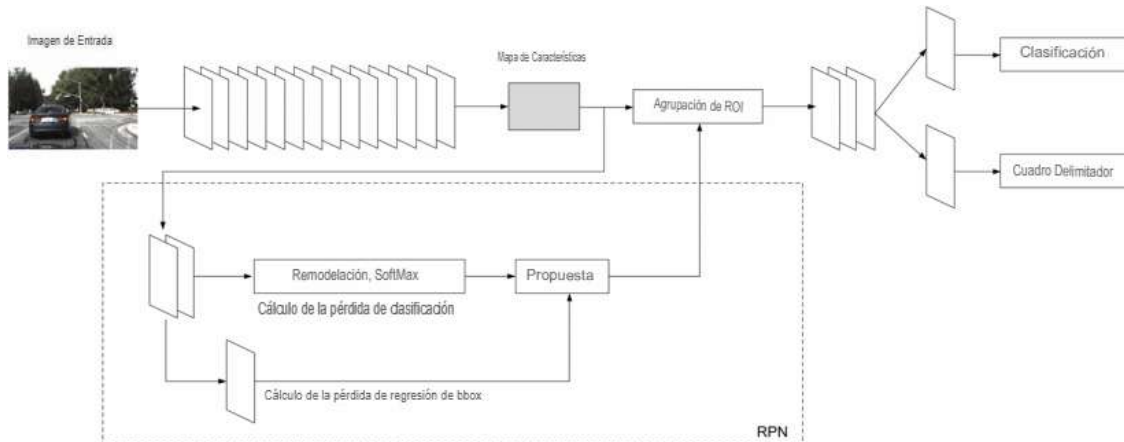


Nota. W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, and A. C. Berg, “Ssd:Single shot multibox detector,” in *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part I 14*, pp. 21–37, Springer, 2016.

2. **Improvement of Object Detection Based on Faster R-CNN and YOLO:** Los avances en inteligencia artificial se han beneficiado notablemente del progreso en la detección de objetos. Por ejemplo, el detector de objetos YOLO v2 es capaz de detectar objetos en tiempo real con una precisión aceptable. A pesar de su menor carga computacional y su mayor velocidad, este detector de una sola etapa no alcanza la misma precisión que los detectores de dos etapas, como el Faster R-CNN. Este estudio propone utilizar el filtro de Kalman para combinar los beneficios de ambos: utiliza los resultados del Faster R-CNN, reconocido por su precisión, como punto de referencia, mientras que el YOLO v2 se emplea como variable flexible. El experimento se lleva a cabo en secuencias de video que contienen imágenes de vehículos. Los resultados sugieren que la fusión de estos algoritmos mediante el filtro de Kalman puede mejorar considerablemente la detección de objetos en tiempo real (Fan *et al.*,

2021).

*Figura 11.*  
Arquitectura R-CNN

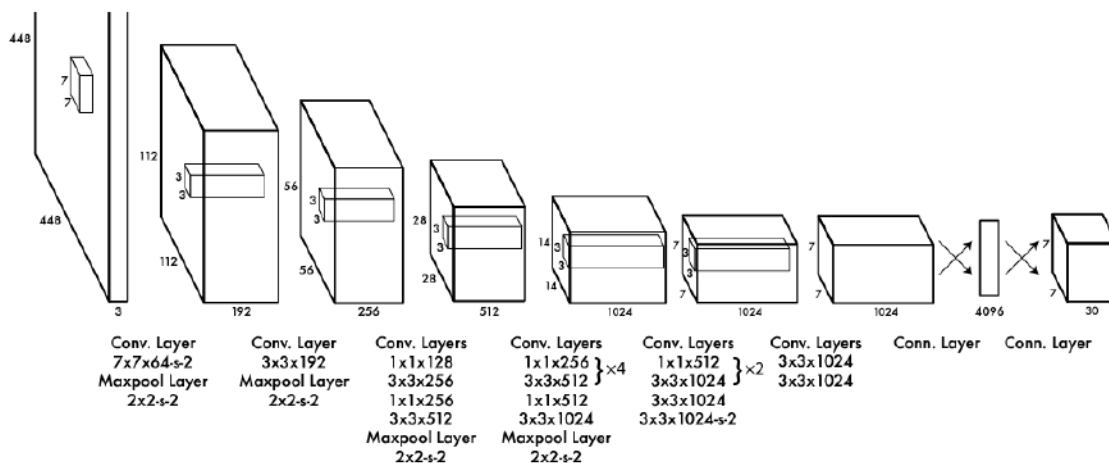


*Nota.* J. y. J. I. y. L. Y. Fan, Jiayi y Lee, “Mejora de la detección de objetos basada en r-cnn y yolo más rápidos,” in 2021 36<sup>a</sup> Conferencia Técnica Internacional sobre Circuitos/Sistemas, Ordenadores y Comunicaciones (ITC-CSCC).

3. **YOLO (You Only Look Once):** YOLO, en su esencia, emplea una sola red convolucional para predecir al mismo tiempo múltiples recuadros delimitadores y las probabilidades de clase correspondientes a esos recuadros. Es entrenado utilizando imágenes completas. Destaca por su excepcional rapidez en comparación con otros métodos convencionales, alcanzando aproximadamente 45 fps en su versión inicial (procesada en una GPU Titan X), y en su versión más veloz supera los 150 fps. Esto implica que es viable procesar transmisiones de video en tiempo real con menos de 25 milisegundos de retraso, según lo señalado por Redmon y otros en 2016, manteniendo un rendimiento computacional óptimo. YOLO también logra el doble de precisión que el promedio de otros sistemas en tiempo real. Tanto el código

de entrenamiento como el de prueba son de código abierto, y se encuentran disponibles diversos modelos preentrenados para su descarga. (Redmon *et al.*, 2016). La arquitectura de la red del modelo está basada en GoogLeNet (modelo para la clasificación de imágenes (Santos, 2013)). La red cuenta con 24 capas convolucionales seguidas de 2 capas con conexiones enteras (fully connected). Se utilizan 1 x 1 capas de reducción seguidas de 3 x 3 capas convolucionales, similar a (Lin *et al.*, 2016). También existe una versión más pequeña de YOLO pensado para lograr una mayor velocidad (con 9 capas en lugar de 24 y menos filtros en esas capas).

Figura 12.  
Arquitectura YOLO



Nota. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, realtime object detection," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 2016.

### **3. Diseño de banda transportadora**

En este capítulo se presenta la estrategia planteada para diseñar un prototipo de banda transportadora que permita un control de velocidad en el desplazamiento de los productos cítricos. En la etapa inicial se comenzó con la revisión de la literatura para comprender el funcionamiento, diseño, materiales y tecnología asociada con las bandas transportadoras. De igual manera se evaluó los distintos enfoques posibles para el control de la velocidad de la banda, así como los diferentes algoritmos de aprendizaje profundo para la detección de productos.

#### **3.1. Consideraciones iniciales y requisitos de diseño**

Si bien en esta primera fase, enmarcada en este proyecto de grado, se utiliza una cámara web. Dentro del grupo de investigación HDSP se contempla la continuación del proyecto con la implementación de una cámara espectral tipo pushbroom. Este tipo de cámara lineal captura imágenes barriendo una escena línea por línea, similar a un escáner. Las cámaras Pushbroom tienen un campo de visión limitado en comparación con las cámaras de matriz. Sin embargo, como primer requisito de diseño se determinó que un ancho de banda transportadora de 50 [cm] y un largo de 1 [m] serían suficientes para observar un transporte óptimo de los productos cítricos. De igual forma se tuvo en cuenta que la tecnología y los materiales empleados debían cumplir con estándares de durabilidad, resistencia al desgaste, facilidad de mantenimiento y bajo precio, así como el fácil

acceso a piezas de repuesto, dado que este prototipo de banda transportadora sería utilizado en entornos rurales sujetos a diversas condiciones climáticas.

Para la fase de diseño del prototipo de banda transportadora, se tomó la decisión de emplear el software de Fusión 360 de Autodesk como herramienta principal. Esta elección se basó en su versatilidad y capacidad de integrar diversos diseños en una sola plataforma, además de contar con la licencia de estudiantes y de poder trabajar desde cualquier ordenador ya que es posible realizar los modelados desde la página web sin necesidad de tener que descargar el software.

### **3.2. Primer etapa de diseño**

En esta primera etapa, se centró en la disposición de las chumaceras, los tambores y el tipo de superficie. Previo al diseño, como se había llevado a cabo una revisión del estado del arte relacionado con los materiales utilizados en la construcción de las bandas transportadoras, se decidió emplear chumacera pedestal con un diámetro de 2[m]. En cuanto a los tambores se consideró un tambor motriz de material PVC y un tambor retorno de material de acero, basándose en la disponibilidad de estos materiales en el grupo de investigación HDSP. De acuerdo a esto se procedió a realizar el diseño en la plataforma de Autodesk.

#### **1. Diseño de chumaceras**

El punto de partida fue el diseño de las chumaceras, tal como se muestra en la Figura 13.a, se diseñaron con el objetivo de facilitar el mantenimiento de la banda y la fácil sustitución de los componentes en caso de falla. Luego, se procedió a la ubicación de las chumaceras en la

superficie de madera (Figura 13.b), durante este proceso, se prestó atención a la disposición de los componentes para garantizar el cumplimiento de los requisitos de diseño relacionados con el largo y ancho de la banda

*Figura 13.*

Diseño y ubicación de chumaceras sobre la superficie de madera



(a) Diseño de chumaceras

(b) Ubicación de chumaceras sobre la superficie.

*Nota.* Se realiza el diseño de las chumaceras utilizando el software Fusion 360. Durante el proceso de diseño se tuvieron aspectos en cuenta como la facilidad de instalación y mantenimiento.

## 2. Diseño de tambor motriz y retorno

El siguiente paso fue realizar el diseño de los tambores, el tambor motriz (Figura 14.a), fue diseñado para conectarse al motor mediante un acople, asegurando así una transición eficiente de la potencia necesaria para el funcionamiento del sistema. En cuanto al tambor de retorno (Figura 14.b), su diseño se centró en facilitar el retorno de la banda transportadora.

*Figura 14.*

Diseño de tambor motriz y tambor retorno



(a) Diseño de tambor motriz

(b) Diseño de tambor retorno

*Nota.* Los tambores motrices y de retorno fueron diseñados considerando aspectos como la eficiencia en la transferencia de potencia, la resistencia estructural y la facilitación del movimiento de la banda transportadora. Se utilizaron materiales y métodos de fabricación adecuados para garantizar un rendimiento óptimo y una larga vida útil en condiciones de operación

### 3. Integración de los componentes de la banda transportadora

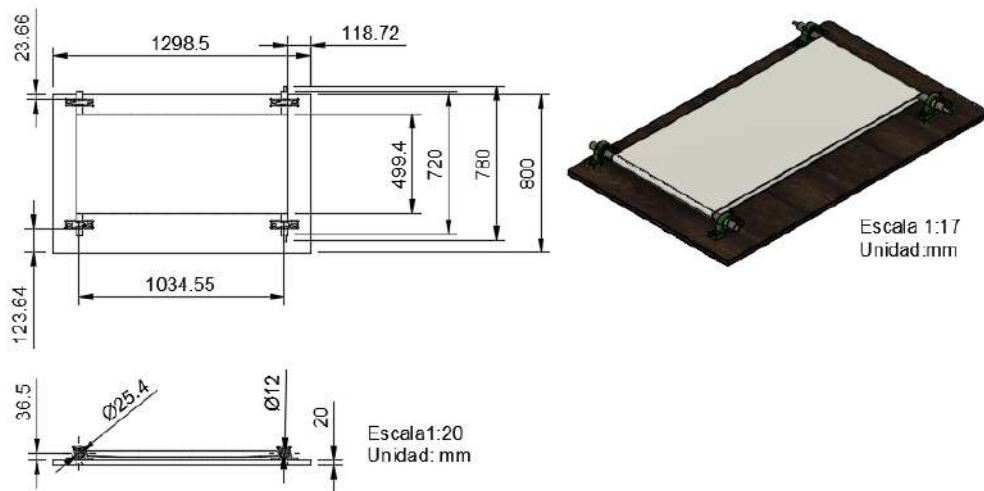
Después de la finalización del diseño individual de cada componente, incluyendo la tela de la banda, se procedió a integrar todos los componentes, culminando en la primera versión del diseño de la banda transportadora. La Figura 15.a, nos ofrece una vista completa de esta etapa, mientras que los planos de la banda (Figura 15.b), proporcionan detalles técnicos específicos, como las dimensiones. Cabe destacar que para esta versión se diseñó una tela lisa de tejido nylon para la banda, lo que asegura un rendimiento óptimo y una larga vida útil en diversas condiciones de operación. Estos planos son fundamentales para la fabricación y montaje precisos de la banda transportador

Figura 15.

Vista general y planos de la banda transportadora



(a) Vista panorámica de la banda transportadora



(b) Planos de la banda transportadora

*Nota.* La vista general de la banda transportadora proporciona una visión completa de la estructura y disposición de los componentes, mientras que los planos detallados ofrecen información técnica para la fabricación y montaje.

### 3.3. Segunda etapa de diseño

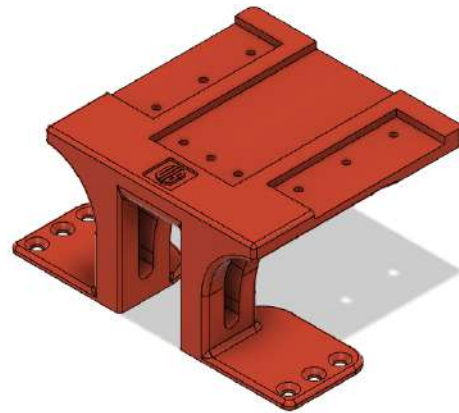
La necesidad de una segunda etapa de diseño surgió a raíz de un problema detectado durante la construcción de la banda transportadora, se observó que la banda mostraba pandeo debido al peso de los productos, como se aprecia en la Figura 16.a. Con el objetivo de abordar esta problemática, se llevó a cabo el diseño de una estructura adicional para brindar soporte adecuado a la banda transportadora. Para ello, se diseñaron soportes específicos destinados a ser impresos en 3D, como se muestra en la Figura 16.b. Estos soportes fueron concebidos para ser conectados con laminas de material de aluminio, con el propósito de contrarrestar eficazmente el pandeo de la banda y asegurar su estabilidad durante el funcionamiento.

*Figura 16.*

Diseño de bases en 3D para soporte de la banda transportadora



(a) Problema de pandeo



(b) Diseño de base en 3D

*Nota.* La subfigura (a) muestra el problema detectado durante la primera etapa de la construcción de la banda transportadora. En la subfigura (b), se presenta el primer diseño en 3D de las bases, el cual tenía como objetivo evitar el pandeo de la banda, reduciendo así la fricción.

### **3.4. Tercera etapa de diseño**

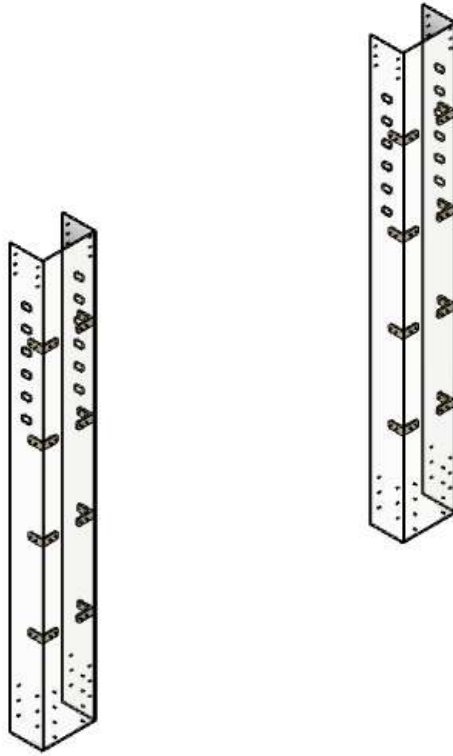
En esta tercera etapa se analizó la disposición de la cámara para la detección de productos cítricos. Se consideraron diversas alternativas de diseño con el objetivo de lograr una solución de bajo costo y eficiente. Una de las opciones evaluadas fue el uso de un trípode; sin embargo, se descartó debido a que no garantiza la estabilidad necesaria para la visualización precisa de la cámara, lo que podía resultar en errores como vibraciones o movimientos no deseados. En su lugar, se exploró el diseño de una estructura específica que permitiera una ubicación óptima de la cámara, asegurando condiciones ideales para la detección de productos cítricos. De acuerdo a esto se procedió a realizar el diseño.

#### **1. Diseño de la estructura de la cámara**

En esta etapa de diseño, nos enfocamos en el desarrollo de la estructura de la cámara para la banda transportadora. Durante esta fase, se diseñó una estructura funcional que garantizara estabilidad a la cámara, considerando aspectos como la resistencia estructural, facilidad de montaje y la durabilidad de los componentes. Además, se tomó en cuenta la posibilidad de graduar la altura de la cámara para adaptar a diferentes necesidades, evitando que quedará fija en una sola posición. La disposición y características de esta estructura pueden visualizarse en la Figura 17.

*Figura 17.*

Diseño para la estructura de la cámara



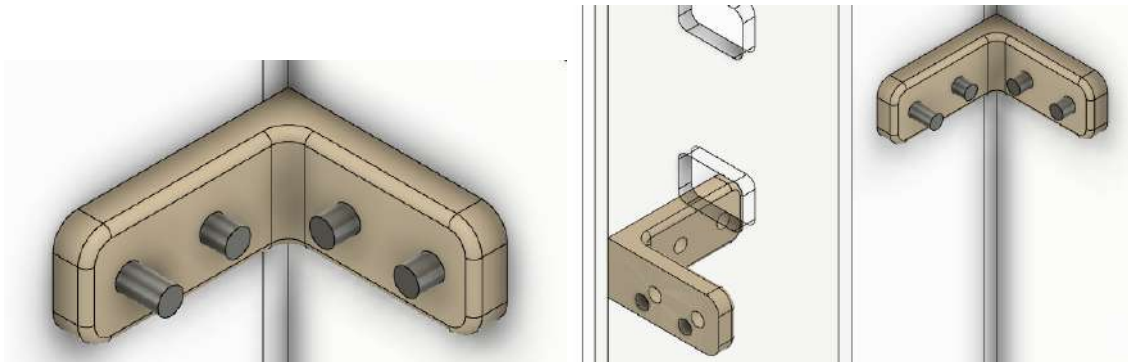
*Nota.* La estructura de la cámara fue diseñada para ser construida en material de acrílico, esto debido a la resistencia y durabilidad del material

## 2. Diseño para unir los perfiles de la cámara

Para mejorar la estabilidad de la banda y prevenir posibles vibraciones, se idearon bisagras diseñadas para unir cada uno de los perfiles de la Figura 17. Tras un análisis, se determinó que era importante equipar cada una de las dos estructuras con un total de 8 bisagras. La disposición y visualización de estas bisagras se puede apreciar en la Figura 18.

*Figura 18.*

Diseño de Bisagras para unir cada perfil de la cámara



(a) Vista detallada

(b) Vista general

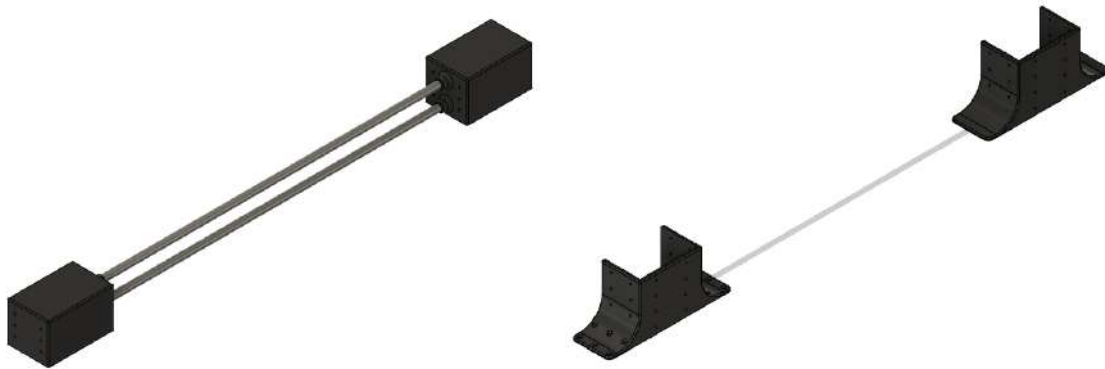
*Nota.* Las bisagras mostradas en la figura fueron diseñadas para unir los perfiles de la estructura de la cámara, proporcionando una mayor estabilidad y resistencia ante posibles vibraciones.

### 3. Diseño de soportes para la fijación de la estructura

Se diseñaron soportes específicos que funcionan como puntos de unión entre las dos estructuras, como se muestra en la Figura 19.a. Además, se idearon soportes para asegurar la fijación de la estructura de la cámara a la tabla de madera. Estos soportes, detallados en la Figura 19.b, han sido diseñados con el propósito de brindar una sujeción sólida y estable, asegurando así la integridad y la seguridad de todo el sistema. Cada soporte está provisto de orificios estratégicamente ubicados para permitir el paso de los tornillos y su conexión con las estructuras de acrílico.

*Figura 19.*

Soportes superior e inferior para la estructura de la cámara



(a) Soporte superior

(b) Soporte inferior

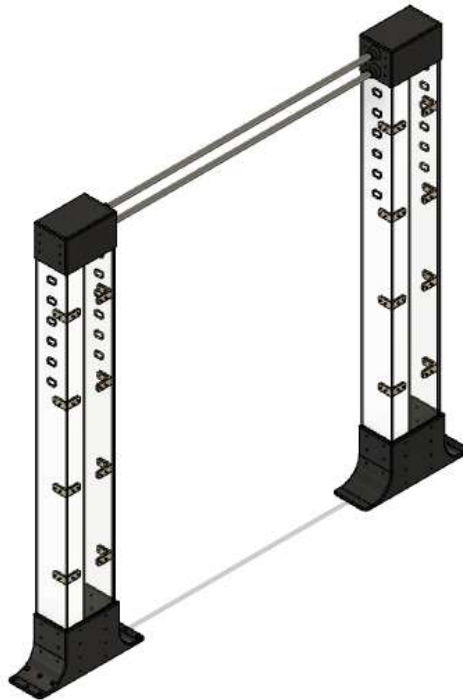
*Nota.* Los soportes superiores proporcionan puntos de unión entre las dos estructuras de la cámara, mientras que los soportes inferiores aseguran la fijación de la estructura a la tabla de madera.

#### 4. Representación final del diseño de la estructura de la cámara

Finalmente, en la Figura 20 se presenta el diseño completo del sistema de la estructura de la cámara, proporcionando una vista detallada del resultado final y la integración de todos los componentes mencionados.

*Figura 20.*

Diseño integral de la estructura de la cámara



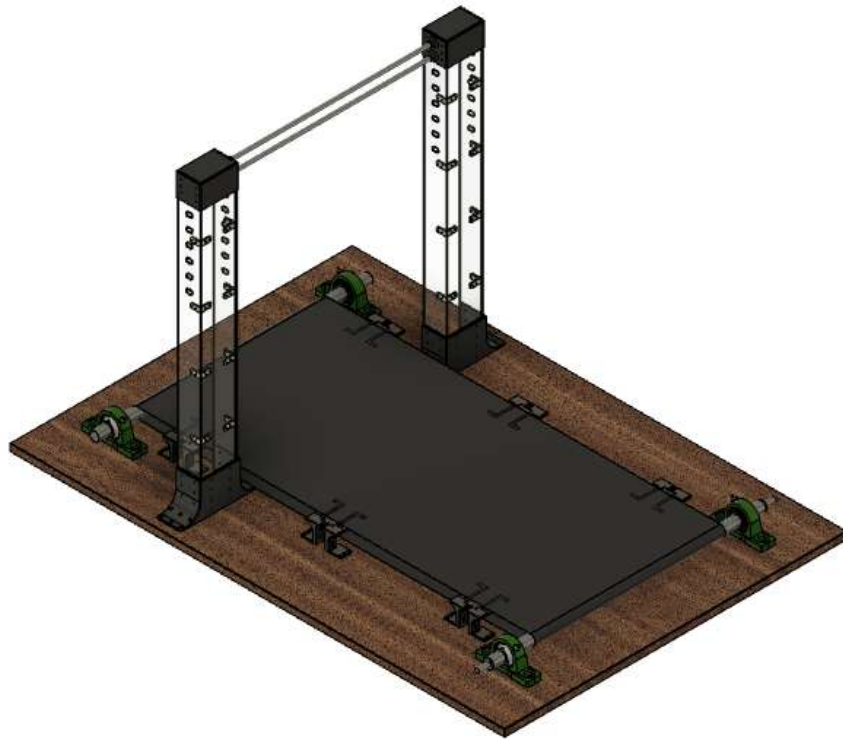
*Nota.* El diseño integral de la estructura de la cámara es crucial para proporcionar estabilidad al sistema. Construía en material de acrílico por su durabilidad

### **3.5. Presentación final del diseño de prototipo de banda transportadora**

Para concluir, el diseño completo de la banda transportadora se presenta en la Figura 21. Este diseño ofrece un solución fluida, adaptable y eficiente para el transporte de los productos cítricos Esta solución marca un avance en la mejora de los procesos de transporte en la industria de productos agrícolas especialmente de los cítricos, al proporcionar una plataforma confiable y adaptable.

*Figura 21.*

Presentación final de banda transportadora



*Nota.* El diseño integral y cuidadosamente elaborado refleja un enfoque centrado en la eficiencia, la adaptabilidad y la fiabilidad, lo que garantiza un transporte seguro y eficaz de los productos cítricos.

## **4. Construcción de banda transportadora**

En esta sección, profundizaremos en el proceso de construcción de la banda transportadora, abarcando desde la selección de los componentes electromecánicos más idóneos hasta la integración y ensamblaje de todos los elementos que conforman la banda.

Se dio inicio a la fase electrónica y de control de la banda transportadora, aprovechando los conocimientos previamente adquiridos durante la etapa de diseño inicial de la banda. Durante la búsqueda de los materiales necesarios para esta fase, se priorizó la identificación de componentes esenciales, entre los que se destacaron un microcontrolador, un motor y un controlador.

### **4.1. Componentes electromecánicos empleados**

#### **1. Placa de desarrollo**

Para el control electrónico de la banda transportadora, se optó por utilizar la Raspberry Pi Pico. Esta elección se fundamentó en varios factores estratégicos. En primer lugar, la disponibilidad de este microcontrolador en nuestro laboratorio nos permitió aprovechar recursos existentes, evitando la necesidad de adquirir otro dispositivo y reduciendo costos. Además, la experiencia previa y la familiaridad del equipo con la plataforma Raspberry Pi facilitaron significativamente el proceso de desarrollo y programación. La versatilidad y el amplio so-

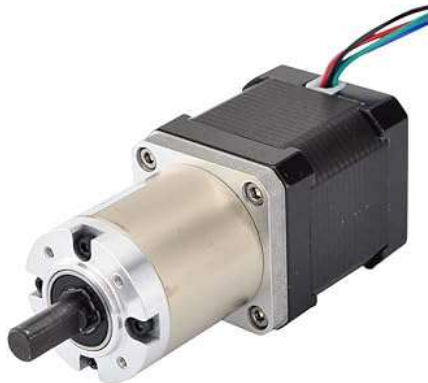
porte de la comunidad de usuarios también fueron consideraciones importantes, ya que nos proporcionaron acceso a una amplia gama de recursos y documentación útil para nuestro proyecto.

## 2. Motor

Se optó por seleccionar un motor paso a paso NEMA 17 de la marca Stepperonline (Figura 22). Este motor se destaca por el par de sujeción de 2[Nm] y la disponibilidad de múltiples configuraciones de velocidad. Además, el motor NEMA 17 ofrece una excelente capacidad de posicionamiento y movimiento preciso, lo que era esencial para garantizar el control en la velocidad de la banda transportadora.

*Figura 22.*

Motor Paso a Paso NEMA 17



*Nota.* 51: 1 Engranaje Planetario High Torque Motor Paso a Paso NEMA 17.

Específicamente, este motor cuenta con una velocidad de 4 RPM y un voltaje de 12 voltios.

Su ángulo de paso es de 0.035 grados, lo que permite un movimiento suave y preciso. La intensidad nominal del motor es de 1,68[A], lo que asegura un rendimiento estable y eficiente en diversas condiciones de operación.

La elección del motor NEMA 17 se basó en la necesidad de ajustar la velocidad del motor de acuerdo con la velocidad de captura de fotogramas de la cámara que se utilizaría. Esta capacidad de ajuste fino nos permitiría mantener un control óptimo sobre el desplazamiento de los productos cítricos en la banda transportadora. Además, la durabilidad y confiabilidad del motor Stepperonline respaldan nuestra decisión de seleccionarlo para nuestro proyecto.

### 3. Controlador

Una vez seleccionado el motor NEMA 17, nos centramos en encontrar un controlador que se ajuste a las características específicas de voltaje y corriente del motor. Nos encontramos con que muy pocos controladores en el mercado podían configurarse para soportar los 1.68[A] de corriente nominal del motor, lo que limitaba nuestras opciones. Tras investigar en el mercado, optamos por el Driver TB6600 como nuestra solución.

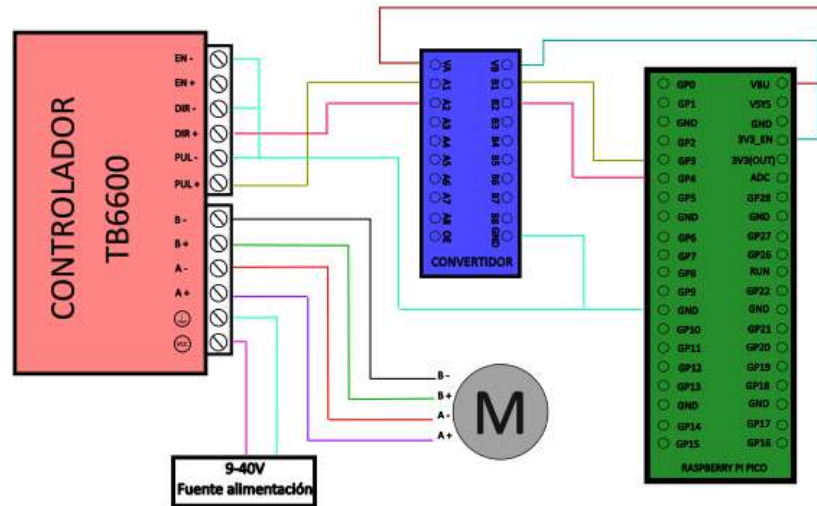
El Driver TB6600 es un controlador diseñado específicamente para motores paso a paso bipolares, con la capacidad de manejar una corriente de salida ajustable en un rango de 0.5[A] a 3.5[A]. Esta amplia gama de corrientes nos ofrece la flexibilidad necesaria para operar el motor NEMA 17 de manera óptima, garantizando un rendimiento eficiente y seguro. Además, el controlador TB6600 necesita una señal de entrada de 5[V] y proporciona una resolución de

micropasos de hasta  $1/32$ , lo que nos permitirá ajustar la velocidad y la precisión del motor según nuestras necesidades específicas.

Una vez reunidos todos los materiales necesarios para el funcionamiento del motor, se comenzó con el proceso de configuración del sistema de conexión. Durante este proceso, nos dimos cuenta de un requisito adicional del driver TB6600 además de su rango de voltaje de alimentación, que va desde  $9[V]$  hasta  $40[V]$ , necesitaba una señal de entrada de  $5[V]$  para operar correctamente. Para cumplir con este requisito y asegurar el funcionamiento óptimo de todo el sistema, necesitábamos integrar un convertidor de voltaje. Optamos por el convertidor bidireccional TXS0108E, que demostró ser la elección más adecuada para nuestras necesidades. Este convertidor ofrece un amplio rango de operación, con un voltaje mínimo de entrada de  $1.2[V]$  y un máximo de  $3.6[V]$ . Además, proporciona un voltaje de salida compatible con las especificaciones del controlador TB6600, con un rango de  $1.65[V]$  a  $5.5[V]$ . Con todos estos componentes a nuestra disposición, procedimos a diseñar y configurar el sistema de conexión necesario para garantizar la compatibilidad y el funcionamiento estable del motor paso a paso. La Figura 23, presenta detalladamente la disposición y conexión de todos los componentes en el sistema, asegurando una implementación efectiva y eficiente.

Figura 23.

Diagrama de conexión entre la placa de desarrollo, controlador, motor y convertidor de voltaje.



*Nota.* Se ilustra la disposición y conexión de los componentes del sistema, incluyendo el motor paso a paso, el driver TB6600, el convertidor de voltaje TXS0108E y la placa de desarrollo Raspberry pi pico.

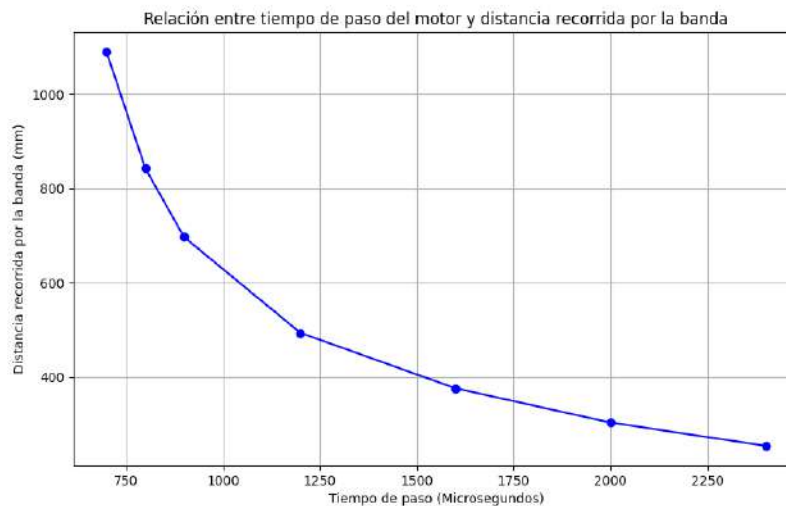
#### 4.2. Caracterización de componentes

La caracterización de los componentes electromecánicos es fundamental para garantizar su correcto funcionamiento en nuestro proyecto de banda transportadora. A través de pruebas y evaluaciones, analizamos las capacidades y especificaciones de cada componente para asegurar su compatibilidad y rendimiento óptimo en el sistema.

#### 4.2.1. Motor Paso a Paso NEMA 17

Una vez adquirido el motor, procedimos a caracterizarlo para determinar la distancia que podría recorrer en la banda transportadora. Este proceso se llevó a cabo de forma manual, observando el motor en funcionamiento y registrando el número de revoluciones por minuto. Ajustamos el tiempo por paso del motor en consecuencia. El resultado de este proceso se muestra en la figura 23.

Figura 24.  
Caracterización del motor Paso a Paso NEMA 17



*Nota.* Caracterización del Motor en Funcionamiento.

#### 4.3. Construcción de la banda transportadora

En esta sección se describe la construcción de la banda transportadora diseñada para el presente proyecto, la cual se realizó con ayuda de materiales electromecánicos provistos por el

grupo HDSP. El propósito principal de esta sección es brindar una visión detallada del proceso de construcción de la banda transportadora. Para ello se incluirá una descripción de las etapas de construcción, pruebas realizadas y resultados obtenidos. Se expondrán los desafíos encontrados durante el proceso de construcción y las soluciones adoptadas para superarlos, así como las mejoras realizadas a los diseños.

### **1. Ensamble inicial**

Para la construcción de la banda transportadora, luego de seleccionar y comprar los materiales electromecánicos requeridos, se llevaron a cabo las conexiones eléctricas que se muestran en la Figura 23. Posteriormente, se procedió con el ensamblaje de las chumaceras, el tambor motriz y el tambor de retorno sobre una superficie de madera, marcando así el inicio del primer ensamblaje de la banda (Figura 25.a). Esta etapa inicial se detalla en la sección correspondiente al diseño inicial del proyecto. Se realizaron pruebas preliminares utilizando una tela lisa de tejido nylon (Figura 25.b), aprovechando que el grupo de investigación ya disponía de este material. Luego de cortar y unir los extremos de la tela para formar la cinta transportadora, se instaló sobre los tambores para llevar a cabo las primeras pruebas de funcionamiento.

*Figura 25.*

Proceso de ensamblaje inicial



(a) Chumaceras, tambor motriz y tambor de retorno



(b) Tela lisa de tejido Nylon

*Nota.* Las imágenes muestran dos aspectos clave del proceso de ensamblaje inicial de la banda transportadora. La subfigura (a) presenta el ensamblaje de las chumaceras, el tambor motriz y el tambor de retorno sobre una superficie de madera. Por otro lado, la subfigura (b) muestra la tela lisa de tejido nylon utilizada para las pruebas preliminares de funcionamiento de la banda

## 2. Primera prueba y problema de pandeo

En la prueba inicial, la banda transportadora demostró su capacidad para transportar diversos productos cítricos. Sin embargo, se identificó un problema significativo de pandeo. A pesar de aplicar mayor tensión, la banda continuaba curvándose debido a que la tela no se pegó completamente recta. Esta deformación se agravaba al agregarle más peso a la cinta transportadora, generando una mayor curvatura en la banda, como se ilustra en la Figura 26

*Figura 26.*

Problema de pandeo en la banda transportadora



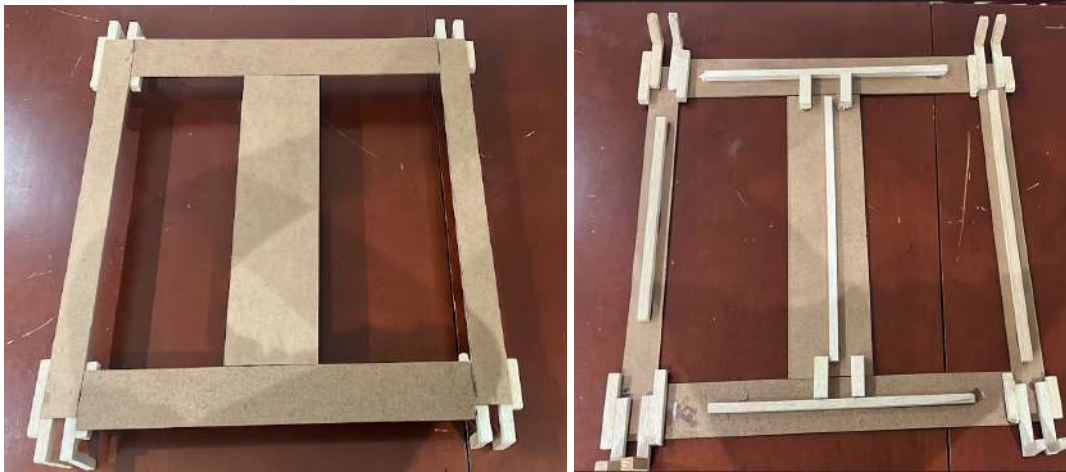
*Nota.* La imagen muestra el problema de pandeo en la banda transportadora, que afecta su funcionamiento y estabilidad durante el transporte de los productos cítricos.

Para abordar el problema del pandeo, se inició el diseño de un prototipo de estructura destinado a brindar soporte. Este prototipo se consideró como una solución integral para contrarrestar la curvatura no deseada de la banda durante el transporte de los productos. La elección de materiales, utilizando palos de balsa y madera, se basó en la facilidad de manipulación para su elaboración ya que no requeríamos herramientas especiales y en su bajo costo.

La Figura 27, muestra el diseño de esta estructura, delineando la disposición y configuración de los elementos para proporcionar el soporte necesario a lo largo de la longitud de la banda transportadora.

*Figura 27.*

Prototipo de estructura de madera para brindar soporte a la banda transportadora

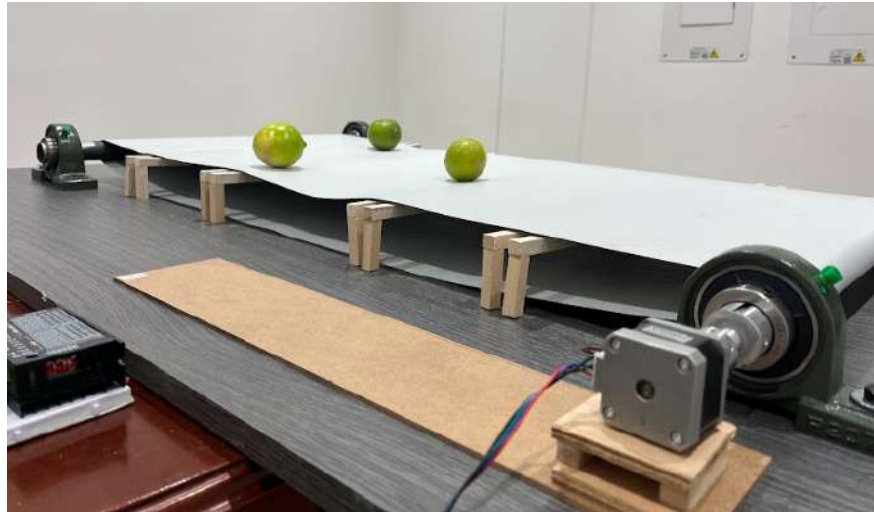


*Nota.* Este prototipo representa una solución preliminar para abordar los desafíos de pandeo de la banda transportadora

Una vez construida esta estructura de soporte, se procedió a su ensamblaje junto a la banda transportadora. Cada elemento de la estructura se integró con precisión, garantizando una conexión firme y estable con la banda. Este proceso de ensamblaje se ilustra en la Figura 28, creando un sistema sólido y funcional que aborda el problema del pandeo.

*Figura 28.*

Ensamble del primer prototipo de la estructura de soporte junto a la banda transportadora



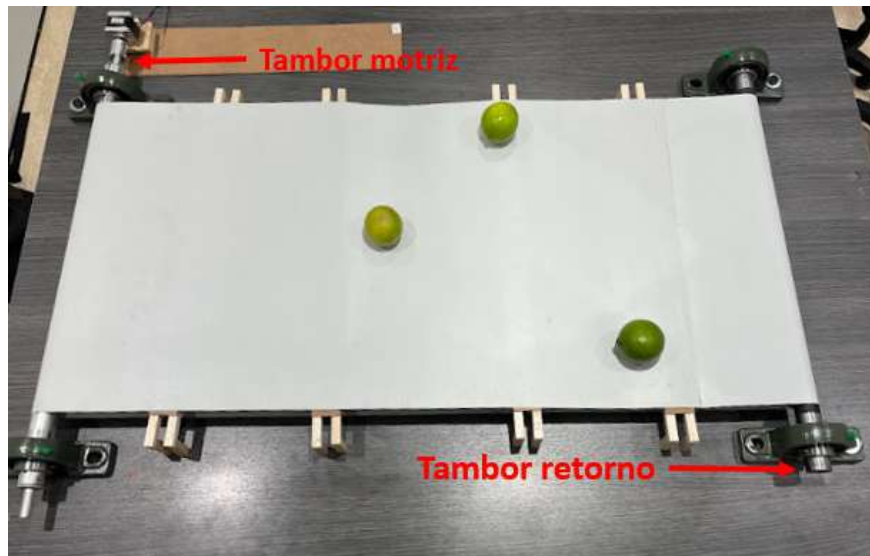
*Nota.* Cada elemento de la estructura se ha integrado cuidadosamente para garantizar una conexión firme y estable con la banda.

### **3. Segunda prueba y problema de movimiento de productos.**

Durante la segunda prueba, una vez que se había resuelto el problema del pandeo de la banda, nos enfrentamos a un nuevo desafío relacionado con el movimiento de los productos cítricos. Nuestro objetivo era que los productos alcanzaran su destino final, que era pasar el tambor motriz (Figura 29). Sin embargo, nos dimos cuenta de que debido a la superficie lisa de la tela de la banda, los productos continuaban desplazándose constantemente y nunca llegaban al punto deseado. Esta situación planteaba un obstáculo para el funcionamiento efectivo de la banda transportadora.

*Figura 29.*

Identificación del tambor motriz y de retorno en la banda transportadora

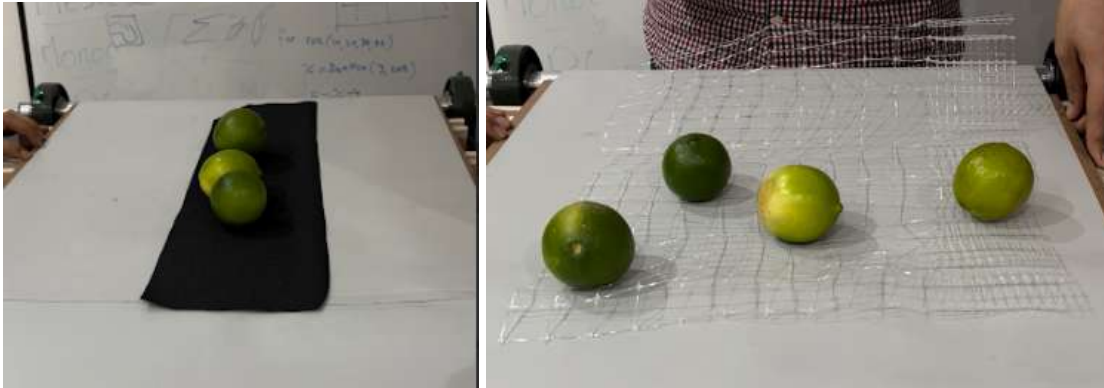


*Nota.* Esta imagen destaca la identificación de los tambores en la banda transportadora: el tambor motriz, responsable de proporcionar el movimiento a la banda, y el tambor de retorno, encargado de facilitar el retorno de la banda a su posición inicial

Para abordar este problema, exploramos diversas opciones. Una de ellas consistió en probar con una tela de superficie más rugosa (Figura 30.a), con la esperanza de que proporcionara mayor adherencia y evitar el movimiento constante de los productos. Otra opción fue ajustar la tela lisa incorporando una malla con dimensiones específicas, diseñada para evitar que los cítricos rodaran y se desplazaran durante el transporte (Figura 30.b).

*Figura 30.*

Exploración de distintas soluciones para el movimiento constante de productos cítricos en la banda transportadora.



(a) Tela de superficie rugosa

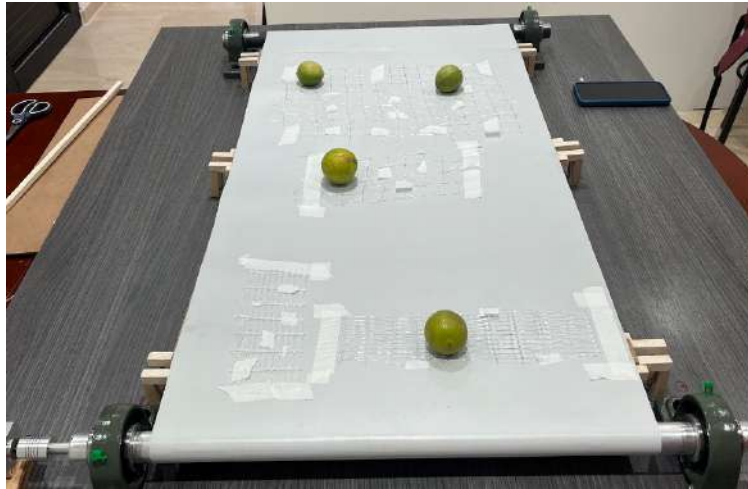
(b) Malla en la tela lisa

*Nota.* Las subfiguras (a) y (b) muestran dos soluciones exploradas para abordar el problema del movimiento constante de productos cítricos en la banda transportadora. La subfigura (a) representa una tela de superficie más rugosa, mientras que la subfigura (b) muestra la incorporación de una malla en la tela lisa.

La opción de utilizar una malla parecía ofrecer una solución prometedora. Por lo tanto, llevamos a cabo pruebas utilizando diferentes tamaños de malla en busca de la configuración más efectiva. La figura 31 proporciona una representación visual de este proceso de experimentación y ajuste.

*Figura 31.*

Pruebas con diferentes tamaños de malla en busca de la configuración más efectiva



*Nota.* La figura ilustra los experimentos con diferentes tamaños de malla en busca de la configuración más efectiva.

Después de realizar varias pruebas, llegamos a la conclusión de que la tela lisa de nylon no era la más adecuada para nuestro proyecto. Basándonos en los hallazgos de nuestro estudio de mercado previo, decidimos cambiar a una tela de plástico que presentaba características más apropiadas para nuestras necesidades.

#### **4. Tercera prueba, implementación de listones.**

habíamos continuado con las pruebas utilizando esta nueva tela, con el objetivo de encontrar la solución óptima para el problema del movimiento de los productos cítricos.

La nueva tela se modificó añadiendo una malla para brindar mayor estabilidad a los productos cítricos y evitar su excesivo movimiento durante el transporte. Esta malla se cosió

cuidadosamente a la tela para asegurar una sujeción firme. A pesar de este ajuste, se observó que los productos aún no lograban pasar el tambor motriz de manera eficiente, debido a que el material de la malla no era lo suficientemente ancho, lo que indicaba que la solución no era completamente satisfactoria. La Figura 32, proporciona una representación visual de este proceso.

*Figura 32.*

Ajuste de una nueva tela con superficie de malla

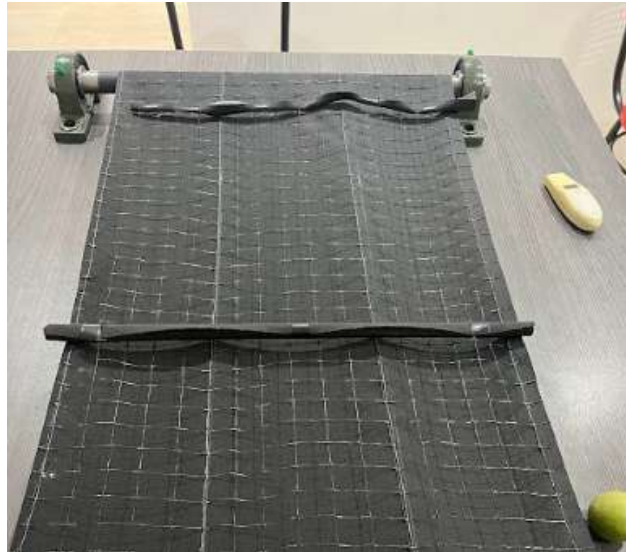


*Nota.* La figura ilustra el proceso de ajuste de una nueva tela con la incorporación de una malla para proporcionar mayor estabilidad a los productos cítricos durante su transporte.

Ante esta situación, decidimos explorar otras alternativas. Una de ellas fue incorporar listones del mismo material de la tela, como se muestra en la Figura 35. Estos listones resultaron ser una solución efectiva para mitigar el movimiento excesivo de los productos. Tras confirmar que esta era la mejor opción, procedimos a desarrollar una versión mejorada de la banda transportadora, utilizando estos listones como parte integral de su diseño.

*Figura 33.*

Incorporación de listones para mitigar movimiento en la banda transportadora



*Nota.* La incorporación de listones logró estabilizar los productos de manera efectiva.

Para esta nueva versión de la banda, se diseñó una separación de 7[cm] entre listones, lo que se determinó como óptimo para el transporte de los productos cítricos. Esta separación se marcó inicialmente con tiza para garantizar una distribución uniforme (Figura 34.a). Posteriormente, se precedió a construir los listones utilizando el mismo material de la tela (Figura 34.b).

*Figura 34.*

Diseño y construcción de listones para una nueva versión de la banda transportadora.



(a) Separación entre listones.

(b) Construcción de los listones.

*Nota.* Estas imágenes ilustran el cuidadoso proceso de diseño y fabricación de los listones para la nueva versión de la banda transportadora. La separación de 7[cm] se seleccionó para garantizar un transporte eficiente de los productos cítricos, mientras que la construcción con el mismo material de la tela garantiza una integridad estructural uniforme.

Finalmente, para unir los listones a la tela, evaluamos diversas opciones. Considerando el equilibrio entre costo y durabilidad, se determinó que la costura era la mejor alternativa. Por lo tanto, se realizó la unión mediante costuras, como se muestra en la figura adjunta, obteniendo resultados satisfactorios y confiables.

*Figura 35.*

Prototipo final de la superficie de la banda transportadora.



*Nota.* La imagen muestra el prototipo final de la unión de listones a la tela de la banda transportadora mediante costuras. Este método fue seleccionado después de evaluar diversas opciones y garantiza una solución efectiva y confiable para el funcionamiento del sistema.

## 5. Evolución de la estructura de soporte de la banda transportadora

Después de confirmar que las estructuras mostradas en la Figura 27 cumplieran con el objetivo de brindar un mayor soporte a la banda transportadora y evitar el pandeo, se inició la segunda etapa de diseño, como se describe en la sección 3.3: Fase de diseño (Figura 16.b), con el fin de hacer que la banda sea estéticamente más atractiva.

### a) Realización de la estructura en impresión 3D.

El diseño inicial (Figura 36), se tradujo en seis estructuras impresas en 3D, destinadas a reforzar la banda transportadora. Se llevó a cabo una primera impresión para evaluar su funcionamiento, pero se detectó que la banda rozaba con la estructura 3D, como se

evidencia en la figura 36

*Figura 36.*

Detección de problemas de roce entre la banda y la impresión 3D



*Nota.* La figura muestra el resultado de la impresión en 3D de las estructuras diseñadas para evitar el pandeo de la banda transportadora. Detectándose el problema de que la tela de la banda rozaba con la impresión 3D.

#### *b)* Mejora y reimpresión del diseño

Tras identificar ese inconveniente, se procedió a mejorar el diseño de la estructura 3D para evitar el roce con la banda transportadora. Se realizó una segunda impresión y se verificó que el diseño corregido cumplía su objetivo de manera satisfactoria como se muestra en la Figura 37 .

*Figura 37.*

Implementación final de las bases en 3D



*Nota.* La figura muestra el resultado de la impresión en 3D de las estructuras diseñadas para evitar el pandeo de la banda transportadora. En esta estructura se ve que la tela ya no roza con la banda.

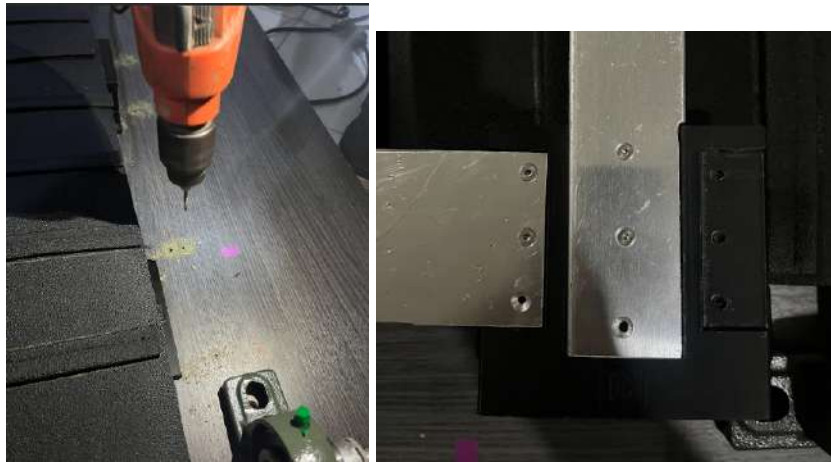
### c) Impresión final y ensamble

Una vez confirmada la eficiencia del diseño corregido, se procedió a completar la impresión de las cinco piezas restantes. Simultáneamente, se realizaron los cortes de las láminas de aluminio según las especificaciones de diseño, obteniendo así los componentes necesarios para la estructura final.

El ensamblaje de la estructura se llevó a cabo sobre la superficie de madera, utilizando un taladro para perforar la superficie (Figura 38.a). Para fijar las impresiones en 3D a las láminas de aluminio se usaron tornillos avellanados tipo Bridgestone como se ilustra en la Figura 38.b.

*Figura 38.*

Construcción de la estructura final para evitar el pandeo de la banda transportadora.



(a) Agujeros en la superficie

(b) Unión de componentes

*Nota.* La figura muestra el proceso de construcción de la estructura final diseñada para prevenir el pandeo de la banda transportadora.

Este proceso de evolución de la estructura de soporte fue fundamental para garantizar una solución efectiva, capaz de abordar los desafíos de estabilidad que surgieron durante el diseño y la implementación de la banda transportadora. Cada etapa de este proceso estuvo cuidadosamente ejecutado, con el objetivo final de proporcionar un soporte resistente y duradero para el funcionamiento fluido y eficiente de la banda. La iteración constante, la evaluación detallada y la optimización continua han sido características esenciales de este proceso, lo que ha permitido alcanzar una solución final que cumple con los requisitos técnicos y operativos de manera óptima. La Figura 41 ilustra claramente el resultado de este proceso, destacando la estructura final de la ban-

da transportadora y subrayando el éxito de esta evolución en la consecución de una solución sólida y funcional.

*Figura 39.*

Representación final de la banda transportadora.



(a) Estructura final de la banda transportadora (b) Representación final de la banda transportadora

*Nota.* La figura muestra la representación final de la banda transportadora, incluyendo su estructura final (subfigura a) y la apariencia completa de la banda ensamblada (subfigura b).

#### 4.4. Construcción de la estructura para la cámara

En el proceso de la construcción de la estructura de la cámara, se comenzó con un prototipo con el fin de analizar si era una estructura óptima. la Figura 42, ilustra el primer prototipo de estructura que implementamos.

*Figura 40.*

Prototipo para la estructura de la cámara

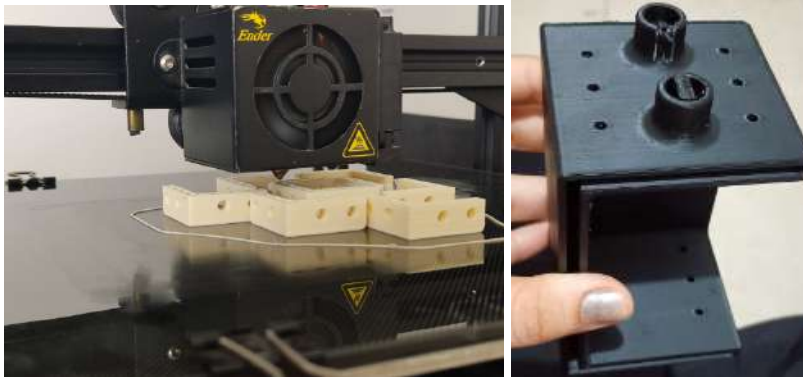


*Nota.* La figura muestra el primer prototipo de estructura para la cámara, con el fin de analizar su diseño y funcionalidad

Posteriormente, tras haber diseñado los componentes en Fusion (Figura 17). El grupo de investigación nos brindó apoyo con las impresiones de las piezas en 3D como se muestra en la Figura 41

*Figura 41.*

Bisagras y estructura superior impresas en 3D



(a) Bisagras en 3D

(b) Estructura superior

*Nota.* La subfigura a, muestra el material diseñado para conectar las laminas de acrílico. La subfigura b, representan los soportes superiores para la cámara diseñados en la Figura 19.a

Finalmente se realiza el ensamble de los materiales, obteniendo la estructura que se presenta en la Figura 42

*Figura 42.*

Diseño final de la estructura para la cámara



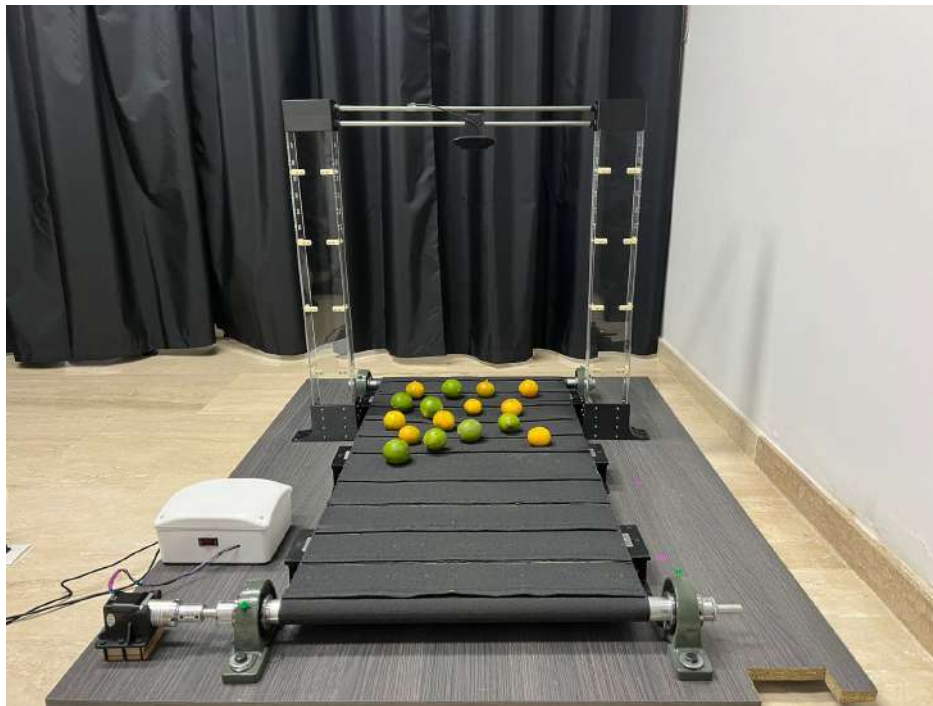
*Nota.* La figura muestra el diseño implementado para la estructura de la cámara

#### 4.5. Ensamble final de la banda transportadora

Con la conclusión de todas las etapas de construcción, hemos logrado ensamblar la banda transportadora en su totalidad. Este proceso garantizó la integración perfecta de cada componente, desde la construcción de la banda misma hasta la instalación de las bases para la cámara de captura de imágenes. El resultado es una banda transportadora completamente funcional como se muestra en la figura 43, lista para su implementación en entornos agrícolas.

*Figura 43.*

Ensamble final de la banda transportadora



*Nota.* La figura muestra la banda transportadora totalmente finalizada.

## 5. Adquisición de la base de datos

El propósito de esta sección es describir el proceso llevado a cabo para adquirir una base de datos necesaria para entrenar un algoritmo de identificación basado en inteligencia artificial. Reconociendo la importancia tanto de la calidad como la diversidad de las imágenes para el éxito del entrenamiento del algoritmo.

Entre los productos cítricos seleccionados para la creación de la base de datos, se encuentran los limones y mandarinas, debido a su importancia como principales productos cítricos de la región de Simacota, Santander. Además, estas frutas fueron elegidas por su amplia disponibilidad y porque son dos tipos de productos con características distintas, lo que permite al algoritmo enriquecer su capacidad para aprender a reconocer patrones y poder identificar los productos.

Reconociendo la importancia tanto de la calidad como la diversidad de las imágenes, para el éxito del entrenamiento del algoritmo, se establecieron criterios para la selección y captura de las imágenes:

- Resolución mínima de 1080 X 720 píxeles.
- Variedad de limones y mandarinas.

- Iluminación adecuada y captura de imágenes desde diferentes ángulos para garantizar una cobertura completa de la banda transportadora

### **5.1. Configuración de cámaras para la base de datos**

Para la creación de la base de datos, se realizaron capturas de imágenes propias utilizando tres tipos diferentes de cámaras: Kanguru, Genius y Logitech. Se llevaron a cabo diferentes pruebas y ajustes para determinar la cámara más adecuada para el proyecto:

- Exposición de luz: Se ajustó la escena de grabación utilizando lámparas y bombillos LED para evitar la saturación de los productos cítricos, garantizando una iluminación uniforme y adecuada sin presencia de sombras.
- Enfoque de cámara: Se descargaron los drivers de cada una de las cámaras, con el objetivo de desactivar el autoenfoco predeterminado y tener un control manual sobre el enfoque de la imagen.
- Resolución: Se configuraron las cámaras para capturar las imágenes con la máxima resolución 1080 x 1080 píxeles.

### **5.2. Pruebas de posicionamiento de la cámara**

Se construyó un prototipo de estructura para ubicar la cámara en una posición óptima para la captura de imágenes (Figura 44). Mediante este prototipo, se realizaron pruebas para

determinar la mejor altura y ángulo de enfoque de la cámara en relación con la banda transportadora. Tras varias pruebas se concluyó que la mejor altura de la cámara era de 30[cm] sobre la banda y el ángulo óptimo de enfoque era a 90°.

*Figura 44.*

Prototipo de estructura para hacer pruebas de posicionamiento de la cámara



*Nota.* Este prototipo fue utilizado durante las pruebas de posicionamiento de la cámara para garantizar una captura de imágenes precisa y consistente.

### 5.3. Selección de cámara

Después de evaluar los resultados de las pruebas, se determinó que la cámara Logitech era la más adecuada para la adquisición de la base de datos, ya que ofrece una alta calidad de imagen y un mayor control sobre los parámetros como la exposición, el balance de blanco y la sensibilidad del ISO. Esta versatilidad nos permitió evitar la saturación de los productos

cítricos bajo diferentes condiciones de iluminación.

#### **5.4. Creación de la base de datos**

Una vez completadas las pruebas relacionadas con el ajuste de la cámara y confirmada su capacidad para evitar la saturación de los productos cítricos, procedimos a la creación de la base de datos. Se seleccionaron 50 limones y 50 mandarinas para este propósito.

La elaboración de la base de datos se llevó a cabo siguiendo de la siguiente manera: Se grabaron 50 limones en un periodo de 30 minutos mientras pasaban por la banda transportadora. Posteriormente, se grabaron 50 mandarinas durante un periodo de 30 minutos y finalmente, se grabaron en conjunto los limones y mandarinas nuevamente durante otros 30 minutos.

##### ***5.4.1. Extracción de fotogramas y preparación de datos***

Una vez obtenidos los tres diferentes vídeos, se procedió a implementar un código en matlab. Este código fue utilizado para extraer los fotogramas del video y guardarlos como imágenes individuales en formato .jpg. Durante el proceso de extracción de fotogramas, se tuvo en cuenta el tamaño de los videos y los intervalos de tiempo para la extracción.

Después de implementar el código en Matlab, se extrajeron un total de 175 imágenes. Luego, para preparar los datos destinados al entrenamiento y validación del modelo, se crearon dos conjuntos de carpetas separadas. En primer lugar, se seleccionó aleatoriamente el 20% de las 175 imágenes obtenidas y se asignaron a la carpeta de validación, mientras que el 80%

restantes se asignaron a la carpeta de entrenamiento. Como resultado, la carpeta de entrenamiento contenía 140 imágenes, mientras que la carpeta de validación tenía 35 imágenes. Es importante destacar que las imágenes de validación no se utilizaron en el proceso de entrenamiento del modelo, sino que se reservaron exclusivamente para evaluar el rendimiento del modelo después del entrenamiento. Paralelamente se creó una base de datos separada para llevar a cabo las pruebas del algoritmo. Durante la grabación del video, se ajustó la exposición de luz y se utilizó cámara Kanguru. Esto resultó en una colección de 20 imágenes para datos de prueba.

#### ***5.4.2. Etiquetado de imágenes***

Para llevar a cabo el etiquetado de las imágenes, se empleó la herramienta LabelImg. Esta herramienta proporciona una interfaz intuitiva que permite a los usuarios seleccionar y etiquetar áreas de interés en las imágenes de manera eficiente. Cada imagen fue cargada en LabelImg y se procedió a dibujar un cuadro delimitador alrededor de cada limón y mandarina, como se presenta en la Figura 45. Posteriormente, se asignaron las etiquetas correspondientes a cada cuadro delimitador, identificando así claramente cada instancia de limón y mandarina en las imágenes. Este proceso se repitió para todas las imágenes tanto del conjunto de entrenamiento, validación y prueba.

Figura 45.

Visualización del etiquetado de imágenes entre limones y mandarinas



*Nota.* La figura muestra la interfaz de la herramienta LabelImg utilizada para etiquetar las imágenes de limones y mandarinas.

Después de completar el proceso de etiquetado de las imágenes, se obtuvieron un total de 1223 etiquetas para el conjunto de datos destinados al entrenamiento del modelo, mientras que para el conjunto de datos de validación se generaron 290 etiquetas y 165 etiquetas para los datos de prueba. Este proceso de etiquetado fue fundamental para asociar cada instancia del limón y mandarina en las imágenes con una etiqueta correspondiente, lo que permitirá al modelo aprender a distinguir entre estos dos tipos de productos cítricos.

En cuanto a la asignación de etiquetas, se asignó la etiqueta cero a los limones y la etiqueta dos a las mandarinas. Esta decisión se tomó con el objetivo de establecer una convención clara que facilite la interpretación y el procesamiento de datos durante el entrenamiento.

## **6. Implementación y resultados del algoritmo YOLO**

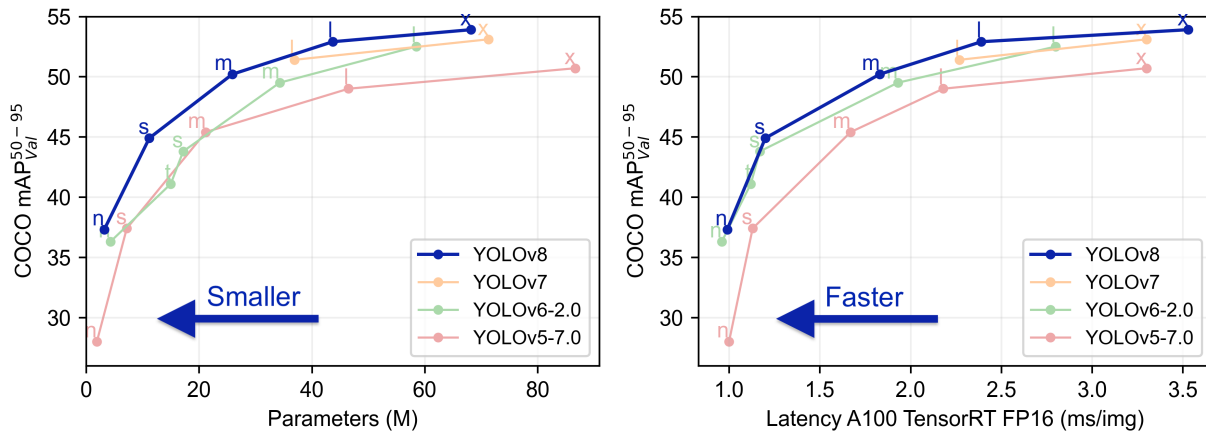
### **6.1. Selección del modelo de aprendizaje automático**

Una vez adquirida y preparada la base de datos para su evaluación, procedimos a investigar los diferentes algoritmos disponibles que pudieran ser implementados. Conscientes de la necesidad de contar con algoritmos altamente efectivos en la identificación de objetos, llegamos a la conclusión de que YOLO (You Only Look Once) representaba una de las opciones más prometedoras. YOLO se destaca como uno de los algoritmos líderes en este ámbito, gracias a su eficiencia y velocidad, sin comprometer la precisión. Su arquitectura única permite el procesamiento de imágenes en tiempo real, convirtiéndolo en una opción ideal para una amplia gama de aplicaciones, que van desde la inspección industrial hasta el control de tráfico y la agricultura.

Al explorar las diferentes variantes de YOLO, observamos que este algoritmo cuenta con varias versiones, como se muestra en la Figura 47.

Figura 46.

Comparativa del rendimiento de entre los diferentes modelos de YOLO



*Nota.* Comparación del rendimiento de detección de objetos de diferentes versiones de YOLO. Jocher, G. (2020). YOLOv5 by Ultralytics (Version 7.0) [Computer software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3908559>

Optamos por implementar el algoritmo YOLOv5 para la identificación de cítricos en nuestra banda transportadora automatizada. Aunque existen versiones más recientes, como YOLOv8, decidimos utilizar YOLOv5 debido a su eficacia comprobada y su capacidad para equilibrar precisión y eficiencia computacional.

Al analizar la Figura 47, observamos que la versión YOLOv5m alcanza resultados comparables con YOLOv8s en métricas cruciales como la MAP (Mean Average Precision), que es fundamental para nuestro proyecto. Es importante tener en cuenta que, si bien ambas versiones pueden lograr métricas similares, los parámetros necesarios pueden variar para cada una. Con esto damos algunas otras ventajas que tiene la elección de yolov5:

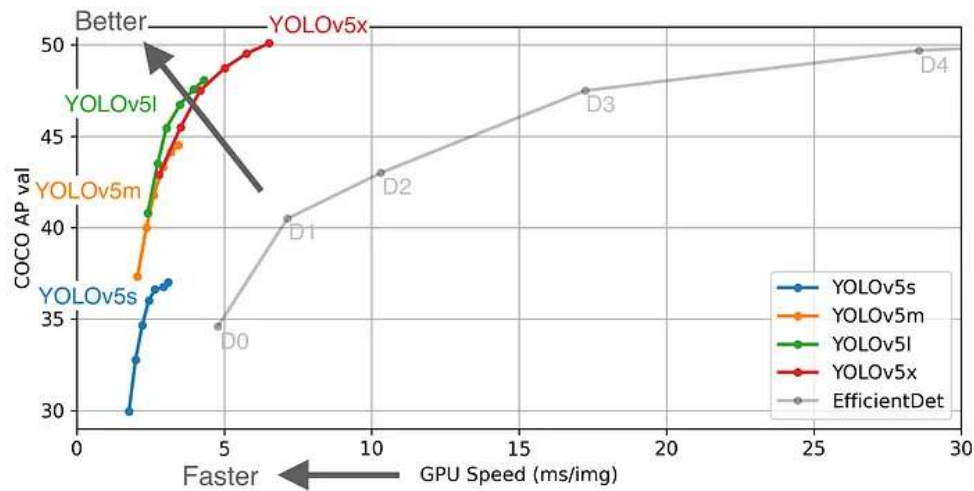
- **Precisión:** YOLOV5 presenta una precisión considerable con un mAP (mean average precision) de 45.0% en el conjunto de datos COCO, lo que lo hace adecuado para la detección de cítricos(Jocher, 2020).
- **Eficiencia:** El tamaño compacto del modelo y su eficiencia en el uso de recursos computacionales lo hacen ideal para implementaciones en dispositivos de bajo costo, lo que reduce costes y facilita la integración en el sistema (Jocher, 2020).
- **Facilidad de uso:** La implementación en código Python facilita su integración con el resto del software del sistema, simplificando el proceso de desarrollo (Jocher, 2020).

Además de sus notables características de implementación, una de las principales razones que impulsaron la elección del uso de YOLOv5 es la visión a largo plazo del grupo de investigación HDSP. Con planes de implementar YOLOv5 utilizando la tarjeta Jetson Nano. La Jetson Nano, al ser una placa de desarrollo con una arquitectura optimizada para aplicaciones de inteligencia artificial y YOLOv5, al estar implementado en Pytorch aseguran una integración auténtica.

Después de esta etapa, se reconoce que YOLOv5 presenta diversas versiones, identificadas como S, M, L y X como se muestra en la Figura 47.

Figura 47.

Comparativa del modelo entre las diferentes versiones de YOLO



*Nota.* Comparación del rendimiento de detección de objetos de diferentes versiones de YOLOv5. Jocher, G. (2020). YOLOv5 by Ultralytics (Version 7.0) [Computer software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3908559>

## 6.2. Evaluación de desempeño y viabilidad

Para analizar el comportamiento de YOLOV5 en la identificación de productos cítricos, se inició con un proceso de pruebas que incluyó la evaluación del desempeño y viabilidad. Optamos por comenzar con la versión YOLOv5s debido a que era la versión de menor tamaño, lo que lo hacía ideal para los recursos computacionales con los que contábamos en esta etapa. Comenzamos con la identificación de los mejores hiperparámetros, posteriormente se probaron diferentes versiones como YOLOv5m y YOLOv5x.

### a) Selección de hiperparámetros

Durante esta fase, realizamos ajustes en los hiperparámetros del modelo y analizamos

los resultados obtenidos en términos de precision<sup>5</sup>, recall<sup>6</sup> y mAP<sup>7</sup>(mean average precision). Los hiperpárametros modificados se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 9

*Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 2*

Funciones de activación	Optimizador	Learning rate	Precision	Recall	mAP
SILU	SGD	0.001	0.97168	0.98711	0.82068
	<b>Adam</b>	<b>0.001</b>	<b>0.99397</b>	<b>0.99603</b>	<b>0.86006</b>
Relu	SGD	0.001	0.97168	0.98711	0.84114
	Adam	0.001	0.99397	0.99603	0.86006
Sigmoide	SGD	0.001	0.97168	0.98711	0.84114
	Adam	0.001	0.99397	0.99603	0.86006

Tabla 10

*Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 4*

Funciones de activación	Optimizador	Learning rate	Precision	Recall	mAP
SILU	SGD	0.0001	0.79666	0.93373	0.72934
	<b>Adam</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.985</b>	<b>0.99968</b>	<b>0.85379</b>
Relu	SGD	0.0001	0.79666	0.93373	0.72934
	Adam	0.0001	0.985	0.99968	0.85379
Sigmoide	SGD	0.0001	0.79666	0.93373	0.72934
	Adam	0.0001	0.985	0.99968	0.85379

Con estos resultados concluimos de que YOLOV5, es un modelo efectivo para la identi-

---

<sup>5</sup> Es la proporción de predicciones correctas realizadas por el modelo sobre el total de predicciones.

<sup>6</sup> Mide la proporción de los casos positivos que el modelo ha identificado correctamente con respecto al total de los casos positivos reales presentes en los datos.

<sup>7</sup> Es una métrica que evalúa la superposición entre la caja delimitadora predicha y la caja delimitadora real del objeto detectado.

Tabla 11

*Tabla de resultados para Batch 8*

Funciones de activación	Optimizador	Learning rate	Precision	Recall	mAP
SILU	SGD	0.001	0.99006	1	0.86285
	Adam	0.01	0.99428	0.99446	0.85152
	SGD	0.001	0.98277	0.97314	0.83897
	Adam	0.001	0.99656	1	0.86404
	SGD	0.0001	0.66728	0.96309	0.70108
	Adam	0.0001	0.98481	0.99637	0.84406
Relu	<b>SGD</b>	<b>0.01</b>	<b>0.99006</b>	<b>1</b>	<b>0.86285</b>
	Adam	0.01	0.99173	0.99428	0.85152
	SGD	0.001	0.98277	0.97314	0.83897
	Adam	0.001	0.99656	1	0.86404
	SGD	0.0001	0.66728	0.96309	0.70108
	Adam	0.0001	0.98481	0.99637	0.84406
Sigmoide	SGD	0.01	0.99006	1	0.86285
	Adam	0.01	0.99173	0.99428	0.85152
	SGD	0.001	0.98277	0.97314	0.83897
	Adam	0.001	0.99656	1	0.86404
	SGD	0.0001	0.66728	0.96309	0.70108
	Adam	0.0001	0.98481	0.99637	0.84406

Tabla 12

*Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 16*

Funciones de activación	Optimizador	Learning rate	Precision	Recall	mAP
SILU	SGD	0.01	0.99276	1	0.86584
	Adam	0.01	0.99401	0.99206	0.86062
	SGD	0.001	0.98092	0.97987	0.83677
	<b>Adam</b>	<b>0.001</b>	<b>0.9942</b>	<b>1</b>	<b>0.86175</b>
	SGD	0.0001	0.63514	0.96462	0.69331
	Adam	0.0001	0.99559	1	0.85091
Relu	SGD	0.01	0.99276	1	0.86584
	Adam	0.01	0.99401	0.99206	0.86062
	SGD	0.001	0.98092	0.97987	0.83677
	Adam	0.001	0.9942	1	0.86175
	SGD	0.0001	0.63514	0.96462	0.69331
	Adam	0.0001	0.99559	1	0.85091
Sigmoide	SGD	0.01	0.99276	1	0.86584
	Adam	0.01	0.99401	0.99206	0.86062
	SGD	0.001	0.98092	0.97987	0.83677
	Adam	0.001	0.9942	1	0.86175
	SGD	0.0001	0.63514	0.96462	0.69331
	Adam	0.0001	0.99559	1	0.85091

Tabla 13

*Tabla de resultados de diferentes configuraciones de modelos para Batch 32*

Funciones de activación	Optimizador	Learning rate	Precision	Recall	mAP
SILU	SGD	0.01	0.98773	1	0.86288
	Adam	0.01	0.99237	0.99542	0.86179
	SGD	0.001	0.97679	0.97469	0.83634
	<b>Adam</b>	<b>0.001</b>	<b>0.99693</b>	<b>1</b>	<b>0.86109</b>
	SGD	0.0001	0.59991	0.9759	0.68718
	Adam	0.0001	0.98955	0.99695	0.84836
Relu	SGD	0.01	0.98773	1	0.86288
	Adam	0.01	0.99237	0.99542	0.86179
	SGD	0.001	0.97679	0.97469	0.83634
	Adam	0.001	0.99693	1	0.86109
	SGD	0.0001	0.59991	0.9759	0.68718
	Adam	0.0001	0.98955	0.99695	0.84836
Sigmoide	SGD	0.01	0.98773	1	0.86288
	Adam	0.01	0.99237	0.99542	0.86179
	SGD	0.001	0.97679	0.97469	0.83634
	Adam	0.001	0.99693	1	0.86109
	SGD	0.0001	0.59991	0.9759	0.68718
	Adam	0.0001	0.98955	0.99695	0.84836

Tabla 14

*Mejores resultados de cada tabla de Batch*

Lote	Funciones de activación	Optimizador	Learning rate	Precision	mAP
2	SILU	Adam	0.001	0.99397	0.86006
4	SILU	Adam	0.001	0.985	0.85379
8	RELU	Adam	0.01	0.99006	0.86285
<b>16</b>	<b>SILU</b>	<b>Adam</b>	<b>0.001</b>	<b>0.9945</b>	<b>0.86175</b>
32	SILU	Adam	0.001	0.9963	0.86109

ficación de productos cítricos. La configuración de la función de activación como SILU o Relu, el optimizador Adam, los tamaños de lote de 16 o 32 y una tasa de aprendizaje entre 0.01 o 0.001 fueron los hiperparámetros que mejor resultado tuvieron para un mejor modelo.

Por lo tanto, la mejor configuración de hiperparámetros para nuestro proyecto, se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15  
*Definición de hiperparámetros para YOLOV5*

<b>Función de activación</b>	<b>Optimizador</b>	<b>Batch size</b>	<b>Learning rate</b>
SILU	Adam	16	0.001

*Nota. La selección de los hiperparámetros presentados corresponden a un análisis de las pruebas realizadas en la tabla (), llevadas a cabo durante 300 épocas.*

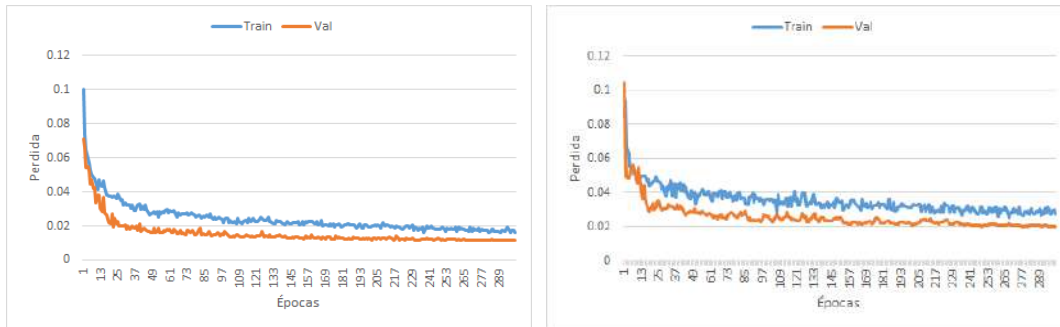
Con esta configuración de hiperparametros se obtuvieron adicionalmente los resultados de box loss, objectness loss y class loss presentes en la Figura 48

- **Box loss (pérdida de caja):** Este parámetro indica la precisión de las predicciones del modelo en términos de las coordenadas de las cajas delimitadoras de los objetos detectados.
- **Objectness loss (pérdida de objetividad):** Mide la precisión con la que el modelo

identifica correctamente la presencia de un objeto en una región de la imagen.

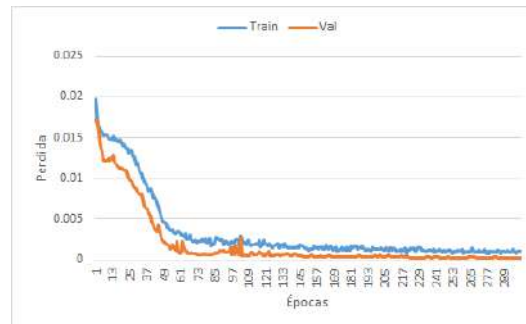
- Class loss (pérdida de clasificación): Evalúa la precisión en la predicción de las clases de los objetos detectados

Figura 48. Análisis de pérdida y rendimiento con configuración óptima de hiperparámetros



(a) Box loss

(b) Objectness loss



(c) Class loss

*Nota. La figura muestra la pérdida asociada a distintos aspectos del modelo, incluyendo la pérdida de caja, pérdida de objetividad y pérdida de clasificación.*

## b) Selección de la mejor versión del modelo

Después de analizar los hiperparámetros, pasamos a la etapa de selección de la mejor

versión del modelo. Durante esta fase, evaluamos las versiones M y X del modelo y obtuvimos los resultados de la Tabla 16:

Tabla 16

*Comparación de rendimiento entre modelos YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOV5x*

Modelo	Precision promedio	Recall promedio	mAP 0.5:0.95	Tiempo [ms]	Tamaño [MB]
YOLOv5s	0.9439	0.9793	0.7993	17.22	14.4
YOLOv5m	<b>0.9496</b>	<b>0.9741</b>	<b>0.8074</b>	<b>22.38</b>	<b>42.1</b>
YOLOv5x	0.9386	0.9670	0.7985	53.22	173.1

*Nota. Los valores de precisión promedio, recall promedio y mAP 0.5:0.95 se calcularon utilizando el conjunto de datos de prueba estándar. El tiempo de interferencia se midió en milisegundos (ms) y el tamaño del modelo se expresa en megabytes (MB).*

Basado en los resultados obtenidos de la Tabla 16, podemos concluir que, en términos de precisión, recall y mAP, la versión de YOLOv5m supera ligeramente a las demás versiones. Sin embargo, YOLOv5s se presenta como el modelo más rápido y con el menor tamaño, lo que sugiere que es la versión con más ligera en términos de almacenamiento.

Por lo tanto, para el desarrollo de este proyecto, se decidió trabajar con la versión de YOLOv5m, ya que es el modelo que ofrece un buen rendimiento sin sacrificar el tiempo de interferencia y el tamaño del modelo, garantizando un adecuado balance.

### 6.3. Implementación del algoritmo

Una vez completado el proceso de etiquetado de la base de datos y seleccionada la mejor versión del modelo, junto con los hiperparámetros óptimos determinados durante la evaluación de desempeño, procedimos a entrenar el modelo YOLO, utilizando la configuración de la Tabla 17.

Tabla 17

*Selección de parámetros para el entrenamiento del modelo YOLO*

Modelo	Función de activación	Optimizador	Batch size	Learning rate	Épocas
YOLOv5m	SILU	Adam	16	0.001	1000

*Nota. Los parámetros para el modelo fueron seleccionados basados en los resultados obtenidos en la Sección 6.1 y 6.2*

### 6.4. Análisis de resultados

En esta fase, procedemos a analizar los resultados obtenidos durante el desarrollo del modelo YOLOv5, centrándonos en las métricas de rendimiento.

Es importante mencionar que el entrenamiento del modelo se detuvo en la época 369 antes de alcanzar el número total de épocas debido a que se activó la técnica de early stopping configurada con una paciencia de 100, ya que no observó ninguna mejora en las últimas 100 épocas. No obstante, los mejores resultados se obtuvieron en la época 269. Con base en los mejores resultados obtenidos en la época 269, se procedió a realizar las pruebas de validación y evaluación del modelo.

**a) Resultados de los datos de validación del modelo**

En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de validación del modelo, incluyendo métricas clave como la precisión, recall y el mAP.

Tabla 18

*Análisis de desempeño de validación del modelo*

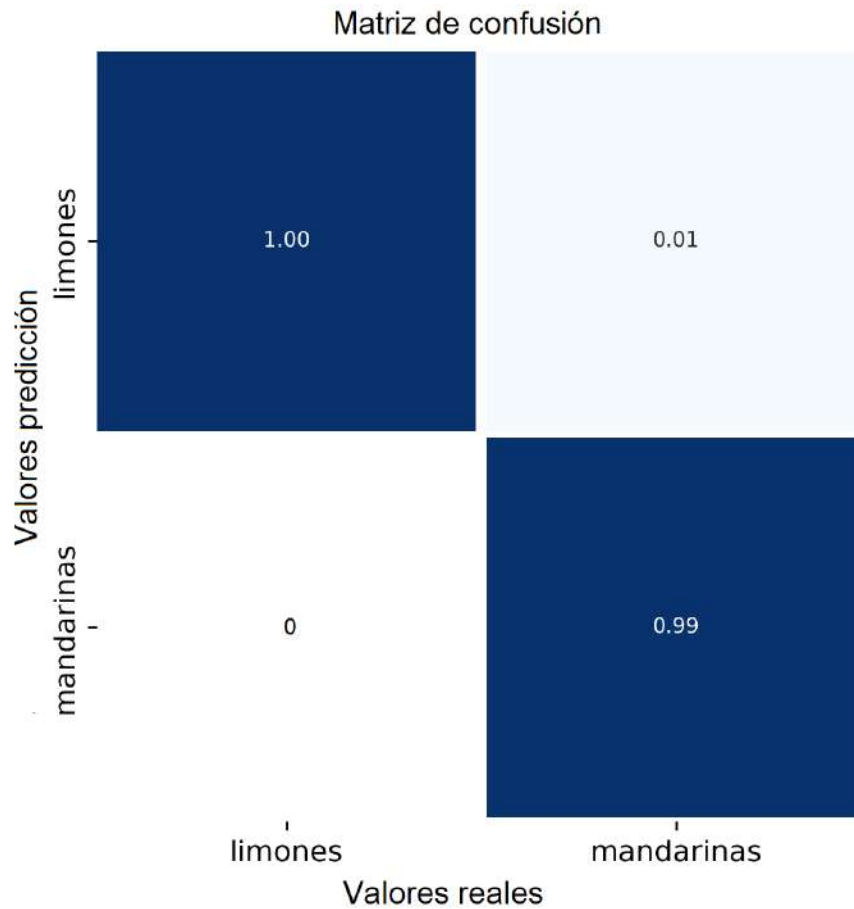
Clase	Precision	Recall	mAP 0.5:0.95
Limón	0.977	1	0.82
Mandarina	1	0.99	0.89

*Nota. Las métricas fueron obtenidas durante el proceso de validación del modelo.*

Posteriormente, estos resultados se utilizan para generar la matriz de confusión (Figura 49) y evaluar más a fondo el rendimiento del modelo.

*Figura 49.*

Matriz de confusión para los datos de validación



*Nota.* La matriz de confusión ilustra las predicciones correctas e incorrectas del modelo para cada clase en los datos de validación.

Basados en la Figura 49, podemos realizar el siguiente análisis:

- La primera métrica que observamos es la precisión en la predicción de limones. Un valor de 1.00 indica que todas las instancias que el modelo predijo como limones realmente pertenecen a la clase limón.

- La segunda métrica está relacionada con la proporción de instancias que fueron incorrectamente clasificadas como limones cuando realmente eran mandarinas, corresponde a un valor de 0.01, siendo una tasa baja lo que representa que el modelo tiene una alta capacidad de distinguir un limón de una mandarina
- La cuarta métrica que observamos es la precisión en la predicción de mandarinas. Un valor de 0.99 indica que todas las instancias que el modelo predijo como mandarinas realmente pertenecen a la clase mandarinas.

**b) Resultados de los datos de prueba del modelo (Test).**

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de prueba del modelo.

Tabla 19

*Análisis de desempeño de prueba del modelo*

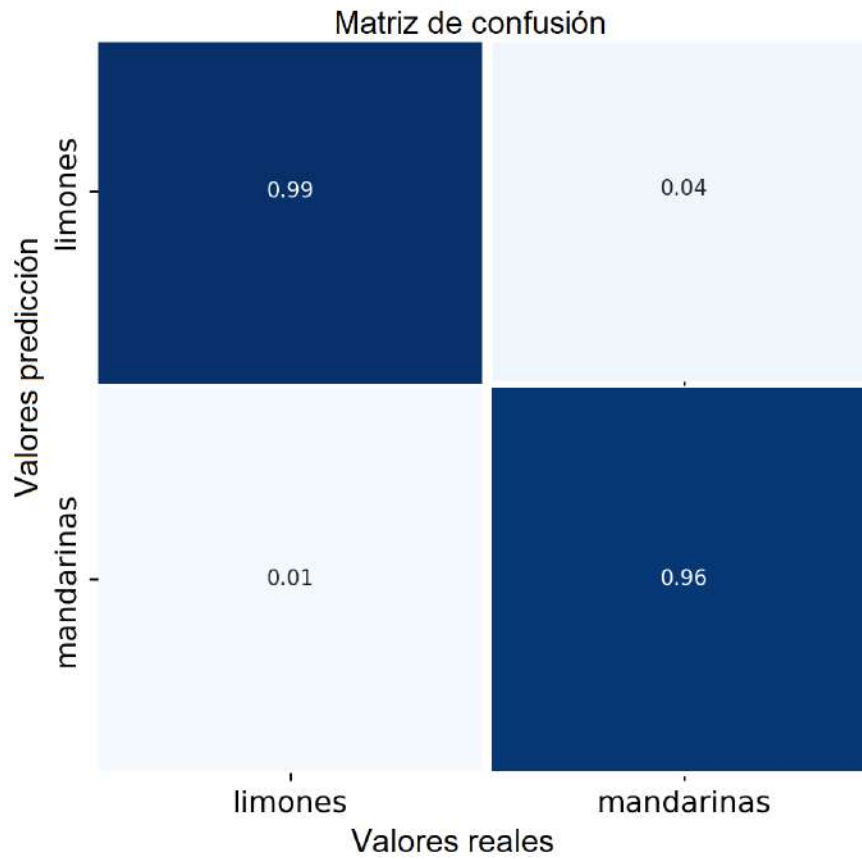
Clase	Precision	Recall	mAP 0.5:0.95
Limon	0.989	0.976	0.505
Mandarina	0.94	0.95	0.614

*Nota. Las métricas fueron obtenidas con los datos de prueba del modelo.*

Posteriormente, estos resultados se utilizan para generar la matriz de confusión (Figura 50 y evaluar más a fondo el rendimiento del modelo.

*Figura 50.*

Matriz de confusión para los datos de prueba



*Nota.* La matriz de confusión ilustra las predicciones correctas e incorrectas del modelo para cada clase entre los datos de prueba.

Basados en los resultados obtenidos de la matriz de confusión, se puede analizar que:

- Para la clase limón: El modelo clasificó correctamente el 99% de los limones y tuvo un 4% que clasificó incorrectamente como mandarinas, es decir, el modelo clasificó incorrectamente algunos limones como mandarinas.

- Para la clase mandarina: El modelo clasificó correctamente el 96 % de las mandarinas y tuvo un 1 % que clasificó incorrectamente como limones, el modelo clasificó incorrectamente algunas mandarinas como fondo.

**c) Resultados de identificación y clasificación de los productos cítricos.**

Las Figuras 51.a y 51.b, muestran una visualización del conjunto de imágenes de validación y prueba, donde se superponen las respectivas muestras con sus respectivas etiquetas y el porcentaje de precisión.

Se puede observar que la precisión en las imágenes es alta y que el modelo está capturando adecuadamente tanto los limones como las mandarinas en las imágenes. Además, se puede evidenciar la capacidad del modelo para detectar y clasificar correctamente una amplia variedad de objetos presentes en cada escena capturada.

Figura 51.

Visualización del proceso de identificación y clasificación de productos cítricos tanto en imágenes de validación y prueba.



(a) Imágenes de validación.



(b) Imágenes de prueba.

*Nota.* Las figuras muestran las predicción en el proceso de identificación y etiquetado de un conjunto de imágenes tanto para validación como para prueba.

## 7. Conclusiones

- Se construyó la banda transportadora cumpliendo con los requisitos de diseño y funcionalidad establecidos al inicio del proyecto. Esto demuestra la viabilidad técnica de implementar una solución de transporte automatizado de bajo costo para la clasificación de productos cítricos en aplicaciones agrícolas en Colombia.
- Se desarrolló el diseño, construcción e implementación de la banda transportadora, utilizando diseños en 3D y materiales fácilmente disponibles, permitiendo el fácil reemplazo de partes mecánicas clave y reduciendo el tiempo de inactividad por fallas o desgaste. Además, la creación de un repositorio que incluye planos de la banda transportadora en archivos en Fusion 360 de cada componente en 3D y una lista en Excel con los costos aproximados de compra, garantizando la continuidad del proyecto a largo plazo.
- Se adquirió una base de datos diversa de imágenes de cítricos, fundamental para el entrenamiento y la evaluación del algoritmo de detección de productos. Esta base de datos proporcionó los datos necesarios para un entrenamiento robusto del modelo, garantizando su efectividad en una variedad de entornos y condiciones.

- Se realizó una evaluación comparativa del rendimiento de diferentes versiones del modelo YOLOv5 en imágenes capturadas por la banda transportadora. Los resultados muestran que YOLOv5m es la opción más equilibrada, ofreciendo un rendimiento satisfactorio en términos de precisión (0.94), recall (0.95) y mAP (0.505) en la identificación de productos cítricos con datos de prueba. Sin embargo, se observó una ligera disminución en la métrica mAP en el conjunto de datos de prueba, en comparación con los datos de validación atribuida a variaciones en las condiciones de captura de imágenes y la presencia de fondo.
- La combinación de tecnologías como el diseño en 3D, la impresión de materiales y el uso de algoritmos de inteligencia artificial como YOLOv5 representa un enfoque innovador y escalable para la identificación y clasificación automatizada de productos cítricos. Este enfoque mejora la precisión y la velocidad en los procesos de clasificación y proporciona una plataforma versátil que puede adaptarse a diferentes entornos y tipos de productos con mínimos requisitos de mantenimiento.
- La implementación exitosa del algoritmo YOLOv5 entrenado con los datos capturados en el marco del proyecto por medio del sistema de banda transportadora valida su eficacia y versatilidad en la detección de productos cítricos. La capacidad de YOLOv5 para identificar y clasificar con precisión los objetos de interés, incluso en condiciones variables de iluminación y fondo, demuestra su idoneidad para aplicaciones del mundo real. Además, la disponibilidad de YOLOv5 como

un código abierto facilita su personalización y adaptación a diferentes escenarios y requisitos específicos del usuario.

### Referencias Bibliográficas

- (2007). *Raspberry Pi fundamentos y aplicaciones*, volumen 1149. Marcombo.
- Arias, F. & Suarez, E. (2016). Comportamiento de las exportaciones de limón persa (*Citrus latifolia tanaka*) al mercado de los estados unidos. *Journal of Agricultura and Animal Sciences*, 5(2):22–33.
- Babiuch, M., Foltýnek, P., & Smutný, P. (2019). Using the esp32 microcontroller for data processing. pp. 1–6.
- Castro, Cristian David Palma and Osorio, Stephanie Rodríguez and others (2011). Tarjetas de desarrollo: Herramientas para el diseño. *Letras ConCiencia Tecnológica*, (11):43–52.
- Fan, J., Lee, J., Yi, L., & Yu, J. (2021). Mejora de la detección de objetos basada en r-cnn y yolo más rápidos. En *2021 36ª Conferencia Técnica Internacional sobre Circuitos/Sistemas, Ordenadores y Comunicaciones (ITC-CSCC)*.
- Farina, A. (2018). Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento. *Suplemento instaladores*.

- Fernández, J. H. R. (2018). Motores eléctricos para la industria. *Ediciones Paraninfo, SA.*, p. 19.
- García, V. (2020, 5 marzo). Descripción del driver a4988 – electrónica práctica aplicada.
- Guzmán, A. (2023). Banda transportadora con ondas. url: [https://www.academia.edu/105327036/BANDA\\_TRANSPORTADORA\\_CON\\_ONDAS](https://www.academia.edu/105327036/BANDA_TRANSPORTADORA_CON_ONDAS).
- Hui, J. (2018). Ssd object detection: Single shot multibox detector for real-time processing.
- Instituto Nacional de Contadores Públicos de Colombia (2021). Dane presenta las cifras reales del campo colombiano.
- Ismailov, Alisher Shakirovich and Jo‘Rayev, Zafar Botirovich and others (2022). Study of arduino microcontroller board. *Science and Education*, 3(3):172–179.
- Jocher, G. (2020). Ultralytics yolov5.
- Khairudin, M., A. R. . S. A. (2020). The characteristics of tb6600 motor driver in producing optimal movement for the nema23 stepper motor on cnc machine.
- Khairudin, M., Asnawi, R., & Shah, A. (2020). The characteristics of tb6600 motor driver in producing optimal movement for the nema23 stepper motor on cnc machine. *Telkomnika*, 18(1):343–350.

Lin, T.-Y., Dollar, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., & Belongie, S. (2016). Yolo: Real-time object detection. En *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

Liu, L., Ouyang, W., Wang, X., & et al. (2020). Deep learning for generic object detection: A survey. *International Journal of Computer Vision*, 128:261–318.

Macplast (2023). Conoce la utilidad de las chumaceras en la industria.

Nistal, F. J. C. (2014). Motores síncronos. *Revista Digital de ACTA*, pp. 3–17.

potencia de la vida, C. (2021). Internacionalización y acceso a nuevos mercados l mincit - ministerio de comercio, industria y turismo.

Procolombia (2021). El mercado de cítricos en el mundo.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. En *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

ROLDÁN VILORIA, J. O. S. (2014). Motores de corriente continua. *Ediciones Paraninfo, SA.*, p. 96.

Texas Instruments (2014). Drv8825 data sheet.

Valdés, F. & Areny, R. P. (2007). *Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC*, volumen 1149. Marcombo.

Vazquez, J. A. E. (2023). Nvidia jetson nano, un mini pc para desarrollo de robótica e inteligencia artificial. *RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación*, 1(1):1–4.

Zhang, X., Yang, Y.-H., Han, Z., Wang, H., & Gao, C. (2013). Object class detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 46.

## **Apéndice**

### **Apéndice A. Código de control del motor paso a paso**

El código desarrollado para controlar el motor paso a paso, junto con la configuración utilizada para su funcionamiento en este proyecto, está disponible en el repositorio de GitHub en la siguiente dirección: <https://github.com/SergioANJ/Tesis.git> La carpeta correspondiente se encuentra ubicada en: `/Tesis/Raspberry/segundocodigo.py`

### **Apéndice B. Diseño de los componentes en 3D**

El diseño de cada una de las piezas impresas en 3D, presentadas a lo largo de este documento, fue realizado por los autores del mismo.

El desarrollo de este material se encuentra disponible en la carpeta de GitHub con ubicación: `/Tesis/Diseño_Fusion`.

### **Apéndice C. Implementación de código para el algoritmo de YOLOv5.**

Los archivos relacionados con la implementación de YOLOv5 para nuestra solución de proyecto están disponibles en nuestro repositorio de GitHub. La estructura de organización del repositorio es la siguiente:

- El código correspondiente a la solución de YOLOv5, se encuentra en la carpeta Tesis/YOLOV5/YOLO.ipynb.
- La base de datos que contiene imágenes de entrenamiento, validación y prueba, junto con sus respectivas etiquetas, están disponibles en la dirección:  
Tesis/YOLOV5/datacopia.zip.
- En la dirección Tesis/YOLOV5/custom22.yaml. Se encuentra el path de dirección donde está ubicada la base de datos y las clases en como fue etiquetado cada imagen.