

Apéndice E. Procedimientos complementarios de implementación del prototipo mecatrónico.

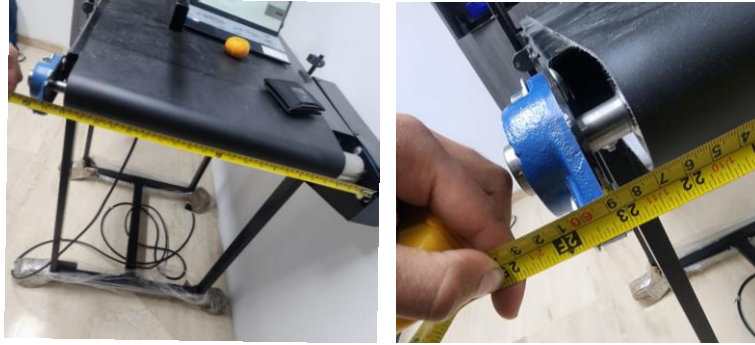
En este apéndice se presentan de manera complementaria los procedimientos relacionados con la implementación del prototipo mecatrónico desarrollado para la clasificación automática de frutos cítricos sobre una banda transportadora. Se describen los aspectos asociados a la adecuación del sistema experimental, el diseño y fabricación de los mecanismos de separación, la integración de los elementos electrónicos y de actuación, así como el proceso de ensamblaje del sistema final.

Asimismo, se incluyen planos, diagramas, fotografías y tablas con las principales características de los componentes empleados, con el propósito de documentar las decisiones de diseño adoptadas y facilitar la reproducción del sistema propuesto.

E.1 Diseño conceptual del sistema de separación

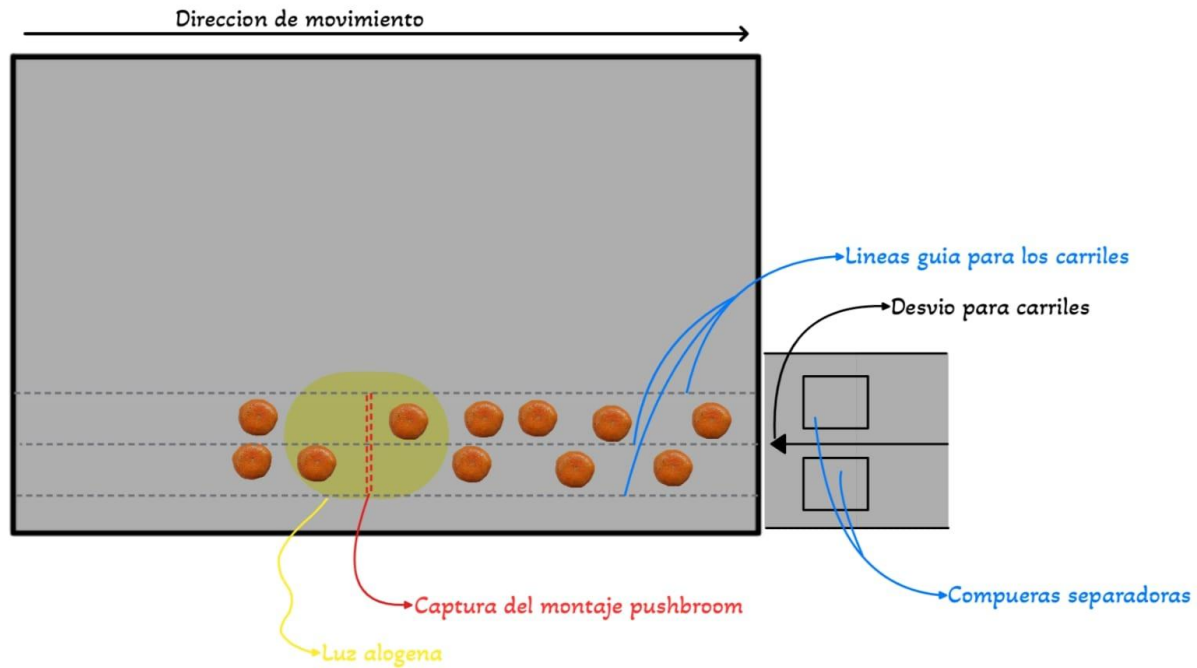
Con el propósito de implementar un sistema de clasificación física para frutos cítricos sobre la banda transportadora del laboratorio HDSP, inicialmente se realizaron mediciones de las dimensiones disponibles en la zona de descarga, tomando como referencia la longitud útil comprendida entre la región de captura y el extremo final de la banda. Estas mediciones permitieron establecer las restricciones geométricas del sistema y definir el espacio disponible para la incorporación del mecanismo de separación.

Figura E.1. *Fotografías de mediciones realizadas a la banda transportadora.*



Dado que el sistema fue concebido para trabajar con dos carriles de clasificación independientes, se planteó un diseño basado en dos mecanismos de accionamiento ubicados al final de la banda transportadora, permitiendo dirigir los frutos hacia diferentes zonas de recolección. A partir de este requerimiento, se elaboraron bocetos preliminares y se definió una disposición simétrica para ambos carriles, buscando garantizar un funcionamiento uniforme y facilitar la integración con el sistema de control.

Figura E.2. *Diseño conceptual preliminar del sistema de clasificación para los dos carriles.*



E.2 Evaluación y selección del mecanismo de compuertas

Con el fin de implementar el sistema de clasificación física de los frutos, se seleccionaron dos mecanismos de accionamiento de compuertas disponibles en plataformas de diseño e impresión 3D. Ambos mecanismos fueron fabricados mediante impresión 3D y montados sobre una estructura provisional elaborada con materiales de bajo costo, permitiendo realizar pruebas experimentales antes de la construcción definitiva del sistema.

Durante esta etapa, se evaluó el comportamiento mecánico de cada propuesta, considerando aspectos como la estabilidad de las compuertas en posición de reposo, la respuesta al accionamiento mediante servomotores, la interacción entre los frutos y el mecanismo durante el proceso de clasificación. Las pruebas se realizaron utilizando servomotores MG90S ubicados por

debajo de la superficie de desplazamiento de las mandarinas, reproduciendo las condiciones de operación previstas para el sistema final.

Figura E.3. *Evaluación experimental de los dos mecanismos de compuertas implementados mediante impresión 3D.*



El primer mecanismo evaluado realizaba la apertura de la compuerta mediante un movimiento ascendente. En posición de reposo, la compuerta permanecía apoyada sobre una superficie fija, permitiendo que los frutos continuaran su desplazamiento sin generar perturbaciones sobre el sistema. Esta característica proporcionó una elevada estabilidad mecánica y redujo la posibilidad de aperturas involuntarias.

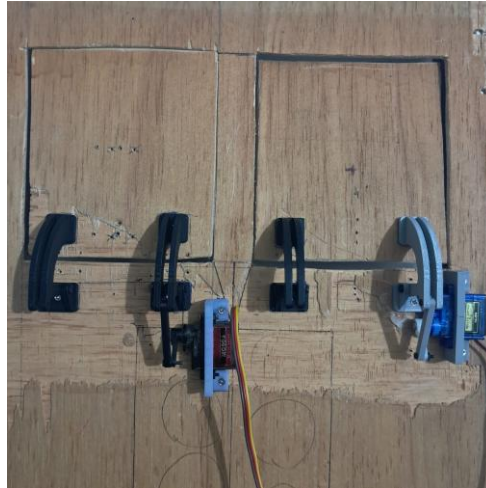
Por otra parte, el segundo mecanismo producía un movimiento descendente de la compuerta, presentando una trayectoria de accionamiento más uniforme. Sin embargo, durante las pruebas se observó que el peso de las mandarinas ejercía una fuerza suficiente para alterar la posición de reposo del mecanismo, ocasionando aperturas parciales no deseadas. Este comportamiento se atribuyó principalmente a las limitaciones de torque de los servomotores MG90S empleados, comprometiendo la confiabilidad del sistema durante la clasificación.

Tabla E.1. *Comparación de los mecanismos de accionamiento evaluados durante la etapa de diseño del sistema de clasificación.*

Característica	Mecanismo ascendente	Mecanismo descendente
Sentido de apertura	Hacia arriba	Hacia abajo
Estabilidad en reposo	Alta	Baja
Influencia del peso del fruto	Baja	Alta
Riesgo de apertura involuntaria	Bajo	Alto
Facilidad de implementación	Alta	Media
Mecanismo seleccionado	Sí	No

Como resultado de las pruebas realizadas, se seleccionó el mecanismo de apertura ascendente para la implementación definitiva del sistema de clasificación. Adicionalmente, se incorporaron modificaciones sobre el diseño original con el propósito de aumentar su estabilidad estructural y evitar desplazamientos laterales durante el movimiento de las compuertas. Estas mejoras permitieron obtener un accionamiento más consistente y garantizar un funcionamiento adecuado durante las pruebas posteriores del prototipo.

Figura E.4. *Mecanismo seleccionado e implementación de refuerzos adicionales para mejorar la estabilidad durante el accionamiento.*

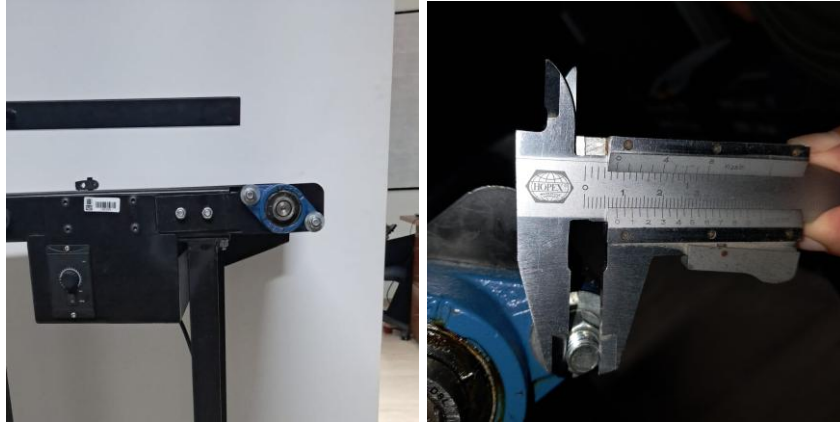


E.3 Implementación del sistema sobre la banda transportadora

Una vez seleccionado el mecanismo de accionamiento más adecuado, se procedió a su integración sobre la banda transportadora disponible en el laboratorio HDSP. Para ello, inicialmente se identificaron elementos estructurales existentes en los extremos de la banda que pudieran ser utilizados como puntos de fijación del sistema de clasificación, evitando realizar modificaciones permanentes sobre la estructura original.

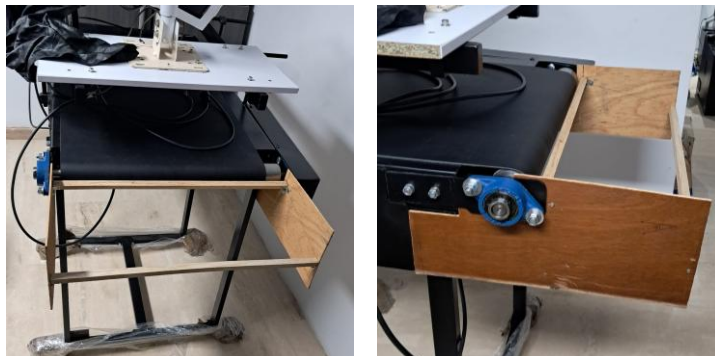
Durante esta etapa se aprovecharon los tornillos encargados de sujetar uno de los ejes extremos de la banda transportadora, utilizándolos como soporte para la instalación de una estructura lateral encargada de sostener el mecanismo de separación. A partir de las dimensiones obtenidas experimentalmente, se fabricaron inicialmente piezas de prueba con el objetivo de verificar el ajuste mecánico y comprobar la viabilidad de la propuesta. Las pruebas realizadas demostraron que el sistema podía ser fijado de forma estable sin interferir con el funcionamiento normal de la banda transportadora.

Figura E.5. Toma de medidas del tornillo soporte para la implementación del sistema de clasificación.



Posteriormente, se incorporaron dos elementos transversales encargados de soportar la plataforma de clasificación. El primero de ellos fue ubicado próximo al extremo final de la banda transportadora, manteniendo una separación aproximada de entre 3 y 5 mm con respecto a la superficie móvil, con el propósito de evitar rozamientos durante la operación. El segundo soporte fue instalado a una distancia aproximada de 30 cm respecto al primero, permitiendo proporcionar rigidez estructural al conjunto.

Figura E.6. Implementación preliminar del sistema de soporte aprovechando los elementos estructurales existentes de la banda transportadora.



Con el propósito de facilitar el desplazamiento de las mandarinas hacia las zonas de recolección, la plataforma de clasificación fue instalada con una inclinación aproximada de 10° , favoreciendo el movimiento por gravedad de los frutos después de abandonar la banda transportadora. Adicionalmente, las compuertas de clasificación fueron ubicadas a una distancia cercana a 3 cm respecto al extremo de la banda, de manera que los frutos clasificados como no aptos continuaran su trayectoria natural hacia la zona de descarte, mientras que aquellos identificados como aptos pudieran ser desviados mediante la activación del mecanismo correspondiente.

Figura E.7. *Implementación del sistema de clasificación con una inclinación aproximada de 10° respecto a la horizontal*

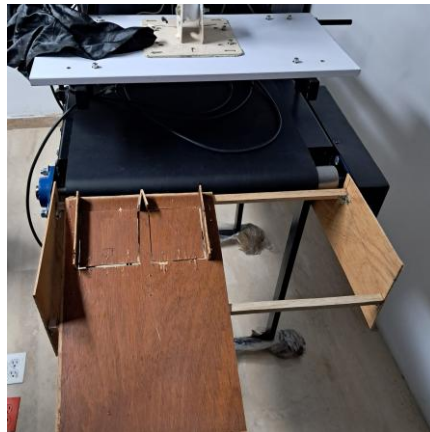


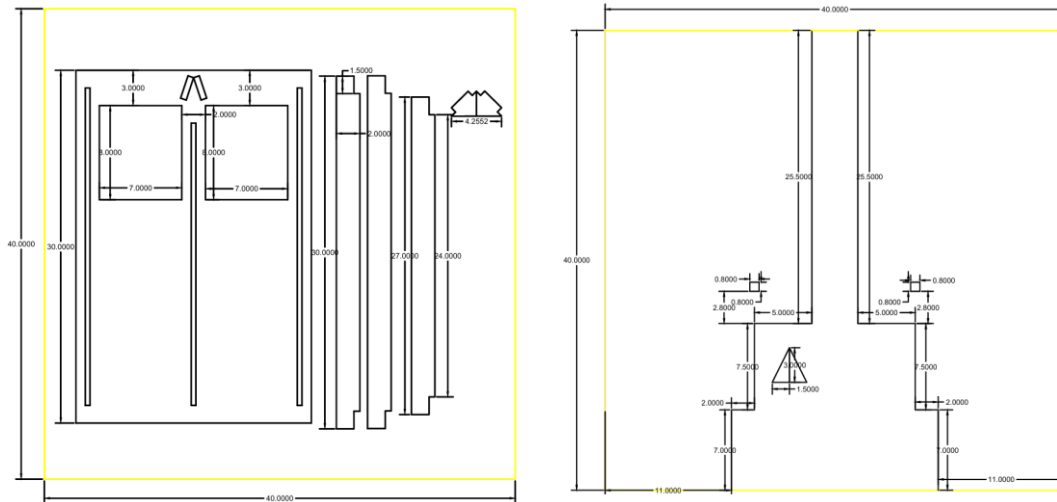
Tabla E.2. *Parámetros geométricos implementados en el sistema de clasificación.*

Parámetro	Valor aproximado
Inclinación del sistema	10°
Distancia entre compuertas y extremo de banda	3 cm
Separación entre soporte y banda	3–5 mm
Distancia entre soportes transversales	30 cm
Número de carriles	2

E.4 Fabricación definitiva mediante corte láser

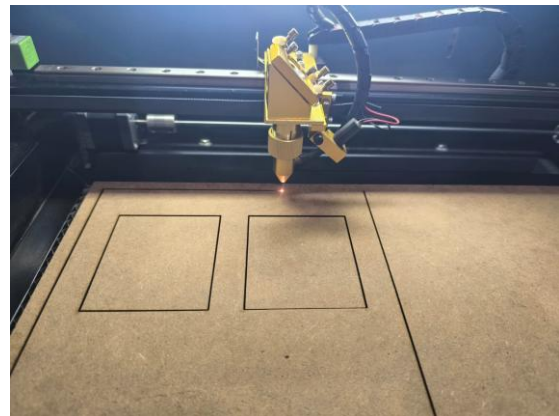
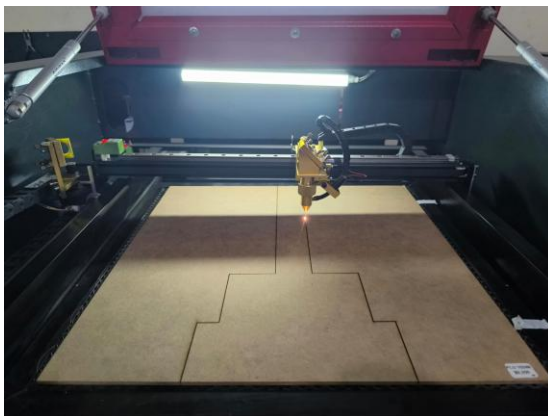
Después de verificar el funcionamiento mecánico del sistema y corregir pequeñas imprecisiones derivadas del proceso de fabricación manual, se procedió al diseño definitivo de las piezas estructurales utilizando el software AutoCAD. Las dimensiones obtenidas experimentalmente fueron utilizadas para elaborar los planos de las bases laterales y de la plataforma de clasificación.

Figura E.8. Planos de fabricación de las piezas estructurales utilizadas en el sistema de clasificación mediante corte láser.



Con el propósito de mejorar la precisión dimensional y el acabado superficial del sistema, los planos fueron exportados en formato vectorial y enviados a un proceso de corte láser sobre tableros de MDF de 4 mm de espesor. Este procedimiento permitió fabricar piezas con mayor exactitud que las obtenidas mediante cortes manuales, reduciendo errores de ensamblaje y facilitando la repetibilidad de los componentes estructurales.

Figura E.9. Fabricación de las piezas estructurales mediante corte láser sobre MDF de 4 mm.



Una vez finalizado el proceso de fabricación, las piezas fueron ensambladas utilizando tornillería y adhesivo estructural, obteniendo una estructura con mayor rigidez y estabilidad respecto al prototipo preliminar. Posteriormente, se verificó nuevamente el ajuste de todos los componentes sobre la banda transportadora, comprobando la correcta alineación de la plataforma, los soportes laterales y los mecanismos de accionamiento. Finalmente, las superficies fueron recubiertas con pintura negra con el propósito de proporcionar una apariencia uniforme con la banda transportadora y reducir el contraste visual entre los diferentes elementos del sistema implementado.

Figura E.10. Estructura definitiva ya ensamblada y pintada (sin electrónica).



Tabla E.3. Componentes estructurales fabricados mediante corte láser para la implementación del sistema de clasificación.

Componente	Material	Método de fabricación
Bases laterales	MDF	Corte láser
Plataforma	MDF	Corte láser
Soportes estructurales	MDF	Corte láser
Elementos de fijación	Tornillería y adhesivo	Ensamble mecánico

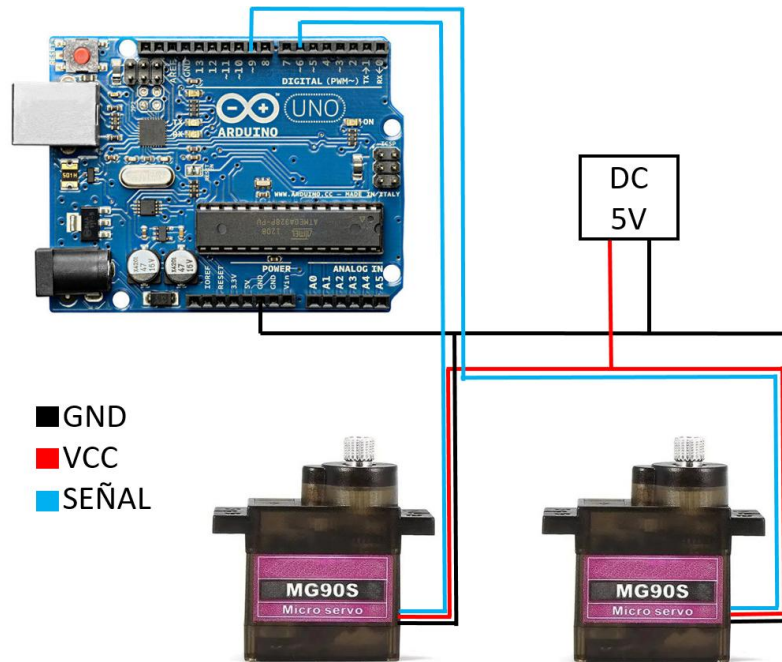
E.5 Integración electrónica y accionamiento

La implementación del sistema de accionamiento se realizó mediante la integración de un sistema electrónico encargado de controlar las compuertas de clasificación ubicadas al final de cada carril de la banda transportadora. Debido a que el prototipo dispone de dos líneas independientes de clasificación, se empleó un servomotor MG90S para cada mecanismo de apertura, permitiendo accionar las compuertas de manera individual según la decisión generada por el algoritmo de clasificación.

El control de los servomotores se implementó mediante una tarjeta Arduino UNO, conectando directamente las señales de control de ambos actuadores a los pines digitales configurados para su accionamiento. Las órdenes generadas por el sistema de clasificación fueron enviadas desde el computador hacia el Arduino mediante comunicación serial, a partir de las cuales el microcontrolador ejecutó el movimiento del servomotor correspondiente.

Debido a la corriente requerida durante el accionamiento de los servomotores, se utilizó una fuente externa de capaz proporcionar 5 V a 2 A para su alimentación, evitando suministrar la potencia requerida por los actuadores directamente desde la tarjeta Arduino UNO. De esta manera, el Arduino permaneció encargado del procesamiento de las órdenes recibidas y de la generación de las señales de control, mientras que la alimentación de los servomotores se realizó mediante la fuente externa, manteniendo una referencia de tierra común entre los componentes del sistema.

Figura E.11. Esquema de conexión implementado para el control de los servomotores MG90S mediante Arduino UNO y fuente de alimentación externa.



La conexión física de los servomotores se realizó sobre la parte inferior de la plataforma de clasificación, permitiendo transmitir el movimiento directamente hacia los mecanismos de apertura de las compuertas sin interferir con el desplazamiento de las mandarinas sobre la superficie superior. Esta ubicación protegió los elementos electrónicos del contacto directo con los frutos y facilitó las labores de mantenimiento y ajuste mecánico del sistema.

Figura E.12. Integración del sistema electrónico instalado en la parte lateral de la plataforma de clasificación.



Con el fin de garantizar un funcionamiento preciso del sistema de clasificación, se desarrolló una herramienta de calibración en Python que permitió ajustar experimentalmente los ángulos de reposo y apertura de cada servomotor. La aplicación establecía comunicación serial con el Arduino, enviando comandos que permitían modificar la posición angular de cada actuador hasta obtener el movimiento requerido por las compuertas.

Figura E.13. Interfaz de la herramienta desarrollada para la calibración individual de los servomotores mediante comunicación serial con Arduino.

```
PS C:\Users\JOHAN GARZON\Desktop\mandarina_swir> venv_mandarina\Scripts\activate
(venv_mandarina) PS C:\Users\JOHAN GARZON\Desktop\mandarina_swir> py calibrador_servo.py

[CAL] Conectando a COM6 @ 115200...
[CAL] Arduino listo.

=====
CALIBRADOR DE SERVOMOTORES v3
=====
'ayuda' → comandos | 'salir' → cerrar

--- Servo 1 ---
Canal PCA9685      : 0
Ángulo reposo      : 0°
Ángulo apertura    : 90°
Diferencia         : 90°
Tiempo apertura    : 400ms
Ángulo actual      : 0°
Límites seguridad  : [10°, 170°]
Invertido          : No
Calibrado          : ▲ pendiente

--- Servo 2 ---
Canal PCA9685      : 1
Ángulo reposo      : 0°
Ángulo apertura    : 90°
Diferencia         : 90°
Tiempo apertura    : 400ms
Ángulo actual      : 0°
Límites seguridad  : [10°, 170°]
Invertido          : No
Calibrado          : ▲ pendiente

calibrador >
```

Durante esta etapa se compensaron pequeñas diferencias mecánicas derivadas del ensamblaje, obteniendo un accionamiento uniforme en ambos carriles. Los ángulos seleccionados garantizaron que las compuertas permanecieran completamente cerradas durante el estado de reposo y alcanzaran la apertura necesaria para permitir el paso de los frutos clasificados como aptos.

Código E.1. *Fragmento de la función implementada para el posicionamiento manual de los servomotores durante el proceso de calibración.*

```
1 def cmd_angulo(self, servo: int, angulo: int):
2     if not self._validar_servo(servo):
3         return
4
5     if not self._validar_angulo_seguro(servo, angulo):
6         return
7
8     ok = self._mover_fisico(servo, angulo)
9
10    print(f"Servo {servo} → {angulo}°")
```

Código E.2. *Fragmento de la función utilizada para registrar los ángulos de reposo y apertura definidos experimentalmente para cada servomotor.*

```
1 def cmd_set_reposo(self, servo: int):
2     angulo = self._servos[servo].angulo_actual
3     self._servos[servo].angulo_reposo = angulo
4
5 def cmd_set_apertura(self, servo: int):
6     angulo = self._servos[servo].angulo_actual
7     self._servos[servo].angulo_apertura = angulo
```

Los parámetros obtenidos mediante el procedimiento de calibración se presentan en la Tabla F.4. Debido a las pequeñas diferencias asociadas al montaje y posicionamiento de los

mecanismos, los ángulos de reposo fueron ajustados individualmente para cada servomotor, mientras que ambos actuadores utilizaron el mismo ángulo de apertura.

Tabla E.4. *Parámetros finales de calibración obtenidos para los servomotores del sistema de clasificación.*

Servomotor	Carril	Ángulo de reposo (°)	Ángulo de apertura (°)
Servo 1	1	13	100
Servo 2	2	12	100

E.6 Prototipo final implementado

Una vez finalizadas las etapas de diseño mecánico, fabricación, ensamblaje e integración electrónica, se obtuvo el prototipo definitivo del sistema automatizado de clasificación de frutos cítricos. El sistema quedó conformado por la banda transportadora del laboratorio HDSP, el sistema de adquisición mediante cámara espectral, el módulo de clasificación mecánica, la electrónica de control y las estructuras de soporte desarrolladas durante el proyecto, constituyendo una plataforma completamente funcional para la clasificación automática de los frutos.

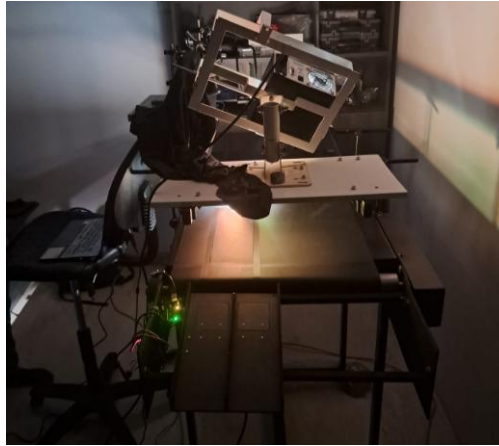
Figura E.14. *Vista general del sistema automatizado de clasificación implementado sobre la banda transportadora del laboratorio HDSP.*



El mecanismo de separación fue instalado al extremo de la banda transportadora, permitiendo aprovechar el desplazamiento natural de los frutos hasta la zona de clasificación. Cuando el sistema determina que una mandarina corresponde a la categoría de fruto apto, el servomotor asociado acciona la compuerta correspondiente y lo mantiene abierto durante aproximadamente 800 ms, tiempo suficiente para permitir el paso del fruto hacia la canasta de aceptación. Posteriormente, el mecanismo retorna automáticamente a su posición de reposo para continuar con el siguiente ciclo de clasificación.

Por el contrario, cuando una mandarina es clasificada como no apta, la compuerta permanece cerrada, permitiendo que el fruto continúe su recorrido por gravedad hasta la zona destinada al descarte sin necesidad de realizar ningún accionamiento adicional.

Figura E.15. *Sistema de separación implementado al final de la banda transportadora y zonas de recolección de los frutos clasificados.*



Con el propósito de mejorar el comportamiento del sistema durante la clasificación, se incorporó un elemento guía en la parte inicial del mecanismo encargado de favorecer la separación entre frutos que se desplazaban muy próximos entre carriles. Esta modificación permitió reducir posibles interferencias entre las trayectorias de los frutos al abandonar la banda transportadora, favoreciendo una clasificación más consistente durante la operación del sistema.

Asimismo, durante la etapa de implementación se realizaron múltiples pruebas de funcionamiento mecánico y electrónico con el objetivo de verificar la repetibilidad del accionamiento de los servomotores, el correcto retorno de las compuertas a la posición de reposo y la estabilidad estructural del mecanismo. Estas pruebas permitieron validar el desempeño del sistema antes de su utilización en las pruebas de clasificación automática.

Figura E.16. Vista posterior del sistema de clasificación, integración de la estructura mecánica y los actuadores.



Tabla E.5. Características generales del prototipo implementado.

Característica	Descripción
Plataforma de transporte.	Banda transportadora del laboratorio HDSP.
Sistema de adquisición.	Cámara espectral SWIR Daheng Imaging MER3-138-136G3M-P-SWIR.
Sistema de separación.	Dos mecanismos independientes accionados por servomotores.
Actuadores.	2 servomotores MG90S.
Controlador.	Arduino UNO
Alimentación de actuadores.	Fuente externa de 5 V.
Tiempo aproximado de apertura.	800 ms.
Método de fabricación.	Impresión 3D y corte láser en MDF.