

**Diseño de un actuador aplicando robótica blanda para la detección y recolección de
frutas**

Idrobo García, Matías Leonardo y Lema Vicuña, Álvaro Sebastián

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Ibarra Jácome, Oswaldo Alexander. MGs

1 de febrero del 2022

COPYLEAKS

TESIS IDROBO LEMA.pdf

Scanned on: 15:19 January 25, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

| | |
|--------------------------|-----|
| Identical Words | 279 |
| Words with Minor Changes | 39 |
| Paraphrased Words | 98 |
| Ommited Words | 167 |



Escaneado electrónicamente por:
OSWALDO
ALEXANDER IBARRA
JACOME



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño de un actuador aplicando robótica blanda para la detección y recolección de frutas**” fue realizado por los señores **Idrobo García, Matías Leonardo** y **Lema Vicuña, Álvaro Sebastián** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 1 de febrero de 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:
OSWALDO
ALEXANDER IBARRA
JACOME

Ing. Oswaldo Alexander Ibarra Jácome, MGs.

C. C.: 1719535427



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, Idrobo García, Matías Leonardo y Lema Vicuña Álvaro Sebastián , con cédulas de ciudadanía No 1723301444 y No 100433360-3 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño de un actuador aplicando robótica blanda para la detección y recolección de frutas** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 1 de febrero de 2022

Idrobo García Matías Leonardo

C.C. 1723301444

Lema Vicuña Álvaro Sebastián

C.C. 1004333603



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, Idrobo García, Matías Leonardo y Lema Vicuña Álvaro Sebastián, con cédulas de ciudadanía No 1723301444 y No 100433360-3 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño de un actuador aplicando robótica blanda para la detección y recolección de frutas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 1 de febrero de 2022

Idrobo García Matías Leonardo

C.C. 172330144-4

Lema Vicuña Álvaro Sebastián

C.C. 1004333603

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi familia y amigos por su constante apoyo, y especialmente a mi abuelito Oswaldo, quien tenía el deseo de verme triunfar.

Matías Leonardo Idrobo García

DEDICATORIA

A Benjamín por devolverme la esperanza y brindarme luz.

A. Sebastián Lema Vicuña

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Iván y Salomé por estar siempre pendientes de mí y apoyarme en todo lo que he necesitado y ser quienes me empujan para poder ser una mejor persona cada día.

A mi tía Chely por ser una segunda madre y estar siempre pendiente de todos, cuidarnos y ser un apoyo más para todos en el hogar.

A mis hermanos Alejandro y Saul por cada risa, molestia y hacer de mi vida mucho más entretenida.

A mis abuelitos Oswaldo, Chela, Blanca y Ángel por sus consejos, conversaciones y estar siempre pendientes de mí y ayudarme a ser quien soy ahora.

A todos mis amigos, del colegio, universidad y de la vida, gracias por acompañarme en este camino.

A mis docentes e ingenieros, pero principalmente al Ing. Alexander Ibarra por su oportuna guía y apoyo en la realización del presente trabajo.

A mi amigo y compañero de tesis Sebastián Lema por su comprensión, compromiso y apoyo en la realización de esta tesis.

Matías Leonardo Idrobo García

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Sebastián por no darse por vencido, por encontrar la ruta y llegar a la meta.

A mis padres Ruth y José Abel por la vida, motivación y la fe. Por ustedes aprendimos a volar y gracias a ustedes nos atrevemos a soñar.

A mis hermanos Karol, Ma. José y Martín por la compañía, la tolerancia y el apoyo mutuo.

A Mirian por todo el cariño, sabiduría y soporte incondicional en mi desarrollo personal, académico y profesional.

A María Cruz, Luis Alcides, Luis Alfredo, Alexandra Josefina por la paciencia y el acompañamiento a lo largo de la carrera.

A la familia Peralvo Luge por brindarme, espontánea y desinteresadamente, el apoyo, la acogida, el respaldo y la motivación que fueron pilar fundamental de la culminación de este proyecto.

A grupo de docentes del DECEM y el DEEE en especial un total agradecimiento al Ing. Alexander Ibarra por su guía y acompañamiento en el desarrollo del presente trabajo.

Un eterno agradecimiento y total admiración para Matías Leonardo por su esfuerzo, dedicación, inteligencia y virtud que han hecho este camino más llevadero, a Nebraska Valentina por la fuerza, cariño y compañía, y en general a quienes han sido parte de este proceso, un eterno sentimiento de Gratitud y Reciprocidad.

A. Sebastián Lema Vicuña

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Abstract | 22 |
| Capítulo I | 23 |
| Generalidades | 23 |
| Antecedentes | 23 |
| Justificación e Importancia | 25 |
| Alcance de proyecto | 26 |
| Objetivos | 27 |
| Objetivo General | 27 |
| Objetivos Específicos | 27 |
| Capítulo II | 29 |
| Fundamentación Teórica | 29 |
| Robótica Blanda (Soft Robotics) | 29 |
| Agarre (Grasping) | 31 |
| Visión Artificial usando Aprendizaje Profundo (Deep Learning) | 33 |
| Estado del arte | 43 |
| Capítulo III | 51 |
| Desarrollo del Sistema | 51 |
| Desarrollo de Hardware mecánico | 56 |
| Diseño y construcción del actuador blando | 56 |

| | |
|---|-----|
| Diseño e implementación del sistema neumático | 74 |
| Diseño y Construcción de la Muñeca | 78 |
| 3.1.1. Diseño y Construcción del Soporte de la Muñeca | 117 |
| Desarrollo del Sistema de Control | 124 |
| Instrumentación | 124 |
| Lazo de Control | 132 |
| Definición del comportamiento del Sistema mediante Identificación. | 133 |
| Sintonización de Controlador | 136 |
| Desarrollo del Hardware electrónico | 139 |
| Diseño del Circuito Electrónico | 139 |
| Construcción del circuito de control | 147 |
| Desarrollo del sistema de visión artificial | 152 |
| Selección de Cámara | 152 |
| Algoritmo de Detección de Objetos | 155 |
| Detección de Objetos con YOLO | 156 |
| Detección de Objetos con SSD-Mobilnet | 157 |
| Aprendizaje de Máquina para Detección de Frutas | 158 |
| Desarrollo de los Sistemas TICs | 162 |
| Desarrollo de la Interfaz Humano Máquina (HMI) | 162 |
| Desarrollo de Red de controladores | 169 |

| | |
|--|-----|
| | 12 |
| Integración final del sistema | 170 |
| Capítulo IV | 172 |
| Pruebas y Análisis de Resultados | 172 |
| Entorno de pruebas | 172 |
| Pruebas y Análisis de Resultados de Visión Artificial: FPS | 174 |
| Pruebas y Análisis de Resultados de Visión Artificial: mAP | 174 |
| Pruebas y Análisis de Resultados de Visión Artificial: Identificación de Objetos en el Entorno de Pruebas | 175 |
| Pruebas y Análisis de Resultados del Agarre: Presión Óptima | 178 |
| Pruebas y Análisis de Resultados del Control | 183 |
| Pruebas y Análisis de Resultados del Agarre: Repetibilidad en Ciclos de Prueba | 186 |
| Capítulo V | 193 |
| Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros | 193 |
| Conclusiones | 193 |
| Recomendaciones | 194 |
| Trabajos Futuros | 195 |
| Bibliografía | 196 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Requerimientos del sistema | 52 |
| Tabla 2 Requerimientos técnicos del producto..... | 53 |
| Tabla 3 Peso Relativo para los requerimientos técnicos | 54 |
| Tabla 4 Subsistemas del Proyecto | 55 |
| Tabla 5 Diseño CAD del actuador blando | 60 |
| Tabla 6 Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para el actuador blando | 65 |
| Tabla 7 Diseño CAD de los moldes | 66 |
| Tabla 8 Selección de Conceptos: Material del molde..... | 67 |
| Tabla 9 Evaluación de Conceptos: Material del molde..... | 68 |
| Tabla 10 Parámetros de configuración de impresora 3D..... | 69 |
| Tabla 11 Ensayos de Compresión Probetas impresas en 3D..... | 69 |
| Tabla 12 Tiempos de impresión de los moldes | 70 |
| Tabla 13 Selección de Conceptos: Material del actuador blando..... | 71 |
| Tabla 14 Evaluación de Conceptos: Material del actuador blando..... | 72 |
| Tabla 15 Materiales utilizados en los actuadores blandos..... | 73 |
| Tabla 16 Selección de Conceptos: Fuente de Alimentación de Aire..... | 76 |
| Tabla 17 Evaluación de Conceptos: Fuente de Alimentación de Aire | 77 |
| Tabla 18 Materiales utilizados en los circuitos neumáticos | 77 |
| Tabla 19 Selección de Conceptos: Mecanismo de Variabilidad de diámetro. | 79 |
| Tabla 20 Evaluación de Conceptos: Mecanismo de variabilidad de diámetro. | 80 |
| Tabla 21 Especificaciones del Tornillo de Potencia THSL-500-8D. | 89 |
| Tabla 22 Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para la muñeca | 95 |
| Tabla 23 Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para el soporte | 101 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tabla 24 | Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para el acople..... | 107 |
| Tabla 25 | Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para la biela..... | 113 |
| Tabla 26 | Detalle de componentes: Análisis de arquitectura modular..... | 114 |
| Tabla 27 | Evolución de Conceptos: Prototipos..... | 115 |
| Tabla 28 | Tiempos de impresión con la configuración 2mm-40%..... | 116 |
| Tabla 29 | Detalle de componentes: Soporte de la Muñeca..... | 117 |
| Tabla 30 | Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado..... | 119 |
| Tabla 31 | Tiempos de impresión con la configuración 2mm-40%..... | 124 |
| Tabla 32 | Especificaciones Generales Sensor de Flexión..... | 125 |
| Tabla 33 | Especificaciones generales Sensor de Fuerza..... | 129 |
| Tabla 34 | Especificaciones generales del Sensor de Presión..... | 131 |
| Tabla 35 | Parámetros para la sintonización de Controlador..... | 137 |
| Tabla 36 | Tabla de comparación de parámetros esperado vs. diseñado..... | 138 |
| Tabla 37 | Motores utilizados en el proyecto..... | 140 |
| Tabla 38 | Selección de Conceptos: Tarjeta de Procesamiento..... | 141 |
| Tabla 39 | Evaluación de Conceptos: Tarjeta de Procesamiento..... | 142 |
| Tabla 40 | Componentes eléctricos utilizados en el proyecto..... | 144 |
| Tabla 41 | Fuentes de Voltaje utilizadas en el proyecto..... | 147 |
| Tabla 42 | Selección de Conceptos: Cámara..... | 153 |
| Tabla 43 | Evaluación de Conceptos: Cámara..... | 153 |
| Tabla 44 | Cámara para el sistema de Visión Artificial..... | 154 |
| Tabla 45 | FPS para los modelos propuestos..... | 174 |
| Tabla 46 | mAP para los modelos propuestos..... | 175 |
| Tabla 47 | Factores y Niveles para Taguchi..... | 176 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 48 Resultados de % de Detección en modelo de Taguchi L9..... | 177 |
| Tabla 49 Presión para Agarre Óptimo..... | 183 |
| Tabla 50 Desempeño del Controlador | 185 |
| Tabla 51 Tabla de resultados de Ciclos de Pruebas de Agarre..... | 186 |
| Tabla 52 Promedio de Agarres óptimos y Repetibilidad General | 192 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Robots Intrínsecamente suaves..... | 31 |
| Figura 2 Exceso de fuerza de agarre..... | 33 |
| Figura 3 Diferencias entre aprendizaje tradicional y aprendizaje profundo..... | 35 |
| Figura 4 Detección de Objetos..... | 37 |
| Figura 5 Arquitectura de YOLO..... | 39 |
| Figura 6 Arquitectura de YOLOv3 | 40 |
| Figura 7 Arquitectura de YOLOv4 y YOLOv5..... | 41 |
| Figura 8 Arquitectura de SSD MobileNet | 42 |
| Figura 9 Pruebas finales del actuador de João Alves | 44 |
| Figura 10 Control de Fuerza en Actuadores Blandos | 45 |
| Figura 11 Gripper blando acoplado a un robot industrial..... | 46 |
| Figura 12 Pruebas del robot recolector de tomates..... | 47 |
| Figura 13 Actuador de SRT | 48 |
| Figura 14 Actuador Inflable blando..... | 49 |
| Figura 15 Pruebas finales con el actuador blando..... | 50 |
| Figura 16 Modelo en V | 51 |
| Figura 17 Casa de la Calidad del proyecto | 54 |
| Figura 18 Presión requerida para doblar completamente el actuador..... | 58 |
| Figura 19 Fuerza generada con diferentes morfologías | 59 |
| Figura 20 Cargas aplicadas al Actuador Blando | 61 |
| Figura 21 Estado de Deformación del Actuador Blando | 62 |
| Figura 22 Tensión equivalente de Von-Mises del Actuador Blando..... | 63 |
| Figura 23 Factor de Seguridad del Actuador Blando..... | 64 |

| | |
|---|-----|
| Figura 24 Mallado del Actuador Blando..... | 64 |
| Figura 25 Análisis de Convergencia del Mallado para el Actuador Blando | 65 |
| Figura 26 Circuito Electro-Neumático del Control Proporcional de Presión | 75 |
| Figura 27 Mecanismo propuesto para la muñeca..... | 81 |
| Figura 28 Mecanismo a considerar | 83 |
| Figura 29 DCL 01: Acople de dedos para determinar la reacción en el eslabón..... | 84 |
| Figura 30 DCL 02: Acople de tuerca para calcular la fuerza necesaria para impulsar el mecanismo..... | 85 |
| Figura 31 Representación de un tornillo de potencia con collarín..... | 86 |
| Figura 32 Representación de un tornillo de potencia con collarín..... | 87 |
| Figura 33 Cargas aplicadas en la muñeca..... | 90 |
| Figura 34 Estado de Deformación de la muñeca | 91 |
| Figura 35 Tensión equivalente de Von-Mises de la muñeca..... | 92 |
| Figura 36 Factor de Seguridad de la muñeca..... | 93 |
| Figura 37 Mallado de la muñeca..... | 94 |
| Figura 38 Análisis de Convergencia del Mallado para la muñeca..... | 95 |
| Figura 39 Cargas Aplicadas al Soporte | 96 |
| Figura 40 Estado de Deformación del Soporte | 97 |
| Figura 41 Tensión equivalente de Von-Mises del Soporte..... | 98 |
| Figura 42 Factor de Seguridad del Soporte | 99 |
| Figura 43 Mallado del soporte..... | 100 |
| Figura 44 Análisis de Convergencia del Mallado para el soporte | 101 |
| Figura 45 Cargas Aplicadas al Acople..... | 102 |
| Figura 46 Estado de Deformación del Acople | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figura 47 Tensión equivalente de Von-Mises del Acople..... | 104 |
| Figura 48 Factor de Seguridad del Acople..... | 105 |
| Figura 49 Mallado del acople | 106 |
| Figura 50 Análisis de Convergencia del Mallado para el acople..... | 107 |
| Figura 51 Cargas Aplicadas a la biela | 108 |
| Figura 52 Estado de Deformación de la biela..... | 109 |
| Figura 53 Tensión equivalente de Von-Mises de la biela | 110 |
| Figura 54 Factor de Seguridad de la biela | 111 |
| Figura 55 Mallado de la biela | 112 |
| Figura 56 Análisis de Convergencia del Mallado para la biela | 113 |
| Figura 57 Cargas aplicadas en el soporte..... | 118 |
| Figura 58 Análisis de Convergencia del Mallado para el soporte | 119 |
| Figura 59 Mallado del soporte..... | 120 |
| Figura 60 Estado de Deformación del soporte | 121 |
| Figura 61 Tensión equivalente de Von-Mises del soporte..... | 122 |
| Figura 62 Factor de Seguridad de la muñeca | 123 |
| Figura 63 Sensor de Flexión de 2.2” | 125 |
| Figura 64 Dinámica del agarre..... | 126 |
| Figura 65 Dinámica del agarre Plano X-Y..... | 127 |
| Figura 66 Comportamiento del Sensor de fuerza Nro. 01 ante la entrada de 1 Psi de presión sobre manzana..... | 128 |
| Figura 67 <i>Histograma con Curva Normal</i> | 128 |
| Figura 68 Gráfica de Cajas 3 Mediciones de Fuerza 1 Psi sobre Manzana | 129 |
| Figura 69 Sensor de Fuerza FSR 402 5 mm..... | 130 |

| | |
|--|-----|
| Figura 70 Ubicación del Sensor en Actuadores Blandos (Dedos) | 130 |
| Figura 71 Sensor de Presión de membrana | 131 |
| Figura 72 Lazo De Control De Presión Propuesto..... | 132 |
| Figura 73 Datos de señal de Entrada y Salida vs. Tiempo | 134 |
| Figura 74 Modelo estimado vs Modelo real digitalizado | 134 |
| Figura 75 Respuestas al Escalón Unitario con diferentes porcentajes de Ciclo de trabajo y Comparación de Respuestas al Escalón Real vs Estimada. | 135 |
| Figura 76 Función de transferencia estimada del Sistema (Tf1) | 136 |
| Figura 77 <i>Respuesta al Escalón unitario en lazo cerrado con controlador y sin controlador PI, parámetros sintonizados.</i> | 137 |
| Figura 78 Función de transferencia del controlador PI | 138 |
| Figura 79 Componentes del subsistema Hardware Electrónico..... | 140 |
| Figura 80 Circuito conversor PWM a Corriente..... | 144 |
| Figura 81 Conexión de los Fines de Carrera y del Sensor de Presión..... | 148 |
| Figura 82 Conexión de los Servo Motores | 149 |
| Figura 83 Conexión del Motor a Pasos | 150 |
| Figura 84 Conexión del Circuito para el Control de la Válvula y del Compresor | 151 |
| Figura 85 Tablero de Control..... | 152 |
| Figura 86 Algoritmo de Detección de Objetos | 156 |
| Figura 87 Detección de Objetos con YOLO | 157 |
| Figura 88 Detección de objetos con SSD-MobileNet | 158 |
| Figura 89 Entrenamiento para Detección de Objetos | 159 |
| Figura 90 Preparación de Cuadros Delimitadores | 160 |
| Figura 91 Finalización del entrenamiento de un modelo de Red Neuronal | 161 |

| | |
|---|-----|
| Figura 92 Detección de frutas | 161 |
| Figura 93 Ventana Principal | 163 |
| Figura 94 Ventana Información..... | 164 |
| Figura 95 Ventana Proceso | 165 |
| Figura 96 Ventana Proceso Manual..... | 166 |
| Figura 97 Ventana Proceso Automático | 167 |
| Figura 98 Ventana Identificación de Fruta | 168 |
| Figura 99 Ventana Agarre de Fruta..... | 169 |
| Figura 100 Topología de la Red de Comunicaciones | 170 |
| Figura 101 Sistema Final | 171 |
| Figura 102 Entorno de pruebas | 173 |
| Figura 103 Ciclo de Pruebas | 179 |
| Figura 104 Resultados medición fuerzas vs presión - PERA..... | 181 |
| Figura 105 Resultados medición fuerzas vs presión - MANZANA..... | 182 |
| Figura 106 Resultados medición fuerzas vs presión sobre - GRANADILLA..... | 182 |
| Figura 107 Gráfica de respuesta al punto de operación 6,8 Psi de simulación vs real (MANZANA). | 184 |
| Figura 108 Gráfica de respuesta al punto de operación 7 Psi de simulación vs real (GRANADILLA). | 184 |
| Figura 109 Gráfica de respuesta al punto de operación 7.2 Psi de simulación vs real (PERA)..... | 184 |
| Figura 110 Gráficas P para Manzanas | 189 |
| Figura 111 Gráficas P para Peras | 190 |
| Figura 112 Gráficas P para Granadillas | 191 |

Resumen

El desarrollo de la agroindustria en Ecuador se ha enfocado en los procesos de siembra y de preparación de la tierra dejando relegadas las fases finales del producto en campo como son la cosecha y recolección. En la actualidad siguen utilizando métodos rudimentarios de recolección mejorados con tecnologías funcionales que no reemplazan en su totalidad al recolector o cosechador, sino que brindan un apoyo evitando enfermedades laborales y aumentando el rendimiento.

El presente trabajo de titulación se enfocó en el desarrollo de un actuador final basado en robótica blanda neumática orientado a la recolección de frutas, de la mano de un sistema de identificación mediante Visión Artificial que fue entrenado utilizando algoritmos de Aprendizaje Profundo (Deep Learning) el cual le permite al sistema detectar la fruta para luego proceder con el agarre óptimo de la misma. Se aplicó un sistema de control clásico PI a un lazo de presión que permite controlar la fuerza aplicada sobre las frutas en el agarre. Se ha instrumentado el actuador para tener una noción de la fuerza resultante aplicada y necesaria para el traslado de frutas, agarre y recolección.

Palabras Claves:

- **ROBÓTICA BLANDA**
- **APRENDIZAJE PROFUNDO**
- **COSECHA DE FRUTAS**
- **AGARRE**

Abstract

The development of agribusiness in Ecuador has focused on the sowing and land preparation processes, leaving behind the final phases of the product in the field, such as harvesting. Currently, they continue to use rudimentary harvesting methods improved with functional technologies that do not completely replace the collector or harvester, but rather provide support avoiding occupational diseases and increase yields.

The present project is focused on the development of a final actuator based on pneumatic soft robotics oriented to the harvesting of fruits, hand in hand with an identification system through Artificial Vision that was trained using Deep Learning algorithms, which allows the system to detect the fruit and then proceed with its optimal grip. A classical PI control system was applied to a pressure loop that allows to control the force applied on the fruits in the grip. The actuator has been instrumented to have a notion of the resultant force applied and necessary for the transfer of fruits, gripping and harvesting.

Key Words:

- **SOFT ROBOTICS**
- **DEEP LEARNING**
- **FRUITS HARVESTING**
- **GRASPING**

Capítulo I

Generalidades

En este capítulo se presenta una introducción del trabajo de investigación realizado en donde estarán detallados los antecedentes, justificación e importancia, su alcance y los objetivos planteados.

Antecedentes

Recolección de frutas

Desde que los seres humanos empezaron a asociarse en grupos con el objetivo común de sobrevivir, y al establecerse como nómadas, la alimentación fue uno de los pilares de dicha supervivencia. En las sociedades paleolíticas se asignaban labores para la recolección, caza y pesca, utilizando para estos enceres, herramientas rústicas como las halladas en Kallambo Falls África, que datan de entre 125.000 y 259.000 años, que muestran artefactos de madera interpretados como herramientas para escarbar (posiblemente utilizados para agricultura o caza) y garrotes. El paso de los años, el desarrollo de métodos de manufactura y las necesidades de las sociedades crecientes han motivado una evolución de estas herramientas hasta llegar a nuestros días, con un sin número de mejoras tecnológicas, en lo que se refiere a agricultura, sin embargo, el área de la recolección y cosecha se han quedado estancadas en técnicas, en su mayoría tradicionales.

En lo que se refiere a la selección e identificación de frutas óptimas los métodos utilizados desde el paleolítico, donde aprendían a diferenciar las frutas maduras y óptimas de las que estaban aún “verdes” o en mal estado, no ha cambiado. Este aprendizaje se heredó de los primates que utilizan el olor y color para diferenciar el estado de las frutas, así como la textura y la consistencia al tacto de las mismas. Este

conocimiento milenario se transmite entre cosechadores, personas que se emplean en el campo para recolectar frutos, quienes reciben las herramientas antes mencionadas que son cada vez más sofisticadas o simplemente optimizadas. Sin embargo, en reemplazo de los cosechadores por máquinas automáticas que asemejen el proceso de selección, extracción y recolección son pocos los avances en investigación.

Necesidades en la industria

La industria agrícola y en específico la industria de la producción de frutos se ha enfocado en la masificación de sus procesos, en la optimización de sus recursos y en el mejoramiento constante de sus productos mediante manipulación de la genética de los mismos. Evidenciamos este gran esfuerzo en innovación al observar la calidad de los frutos a los que se puede acceder y además en las nuevas tecnologías empleadas en los diferentes procesos como la siembra automática, el riego por goteo o la automatización y control de dosificación de químicos.

En cuanto a la cosecha el reto de la industria radica en el tiempo y la optimización de la energía. Además de que ciertas industrias ligadas a alimentación como la culinaria requieren de productos de primera calidad que cumplan con estándares en todos los procesos en especial en el proceso de cosecha, recolección y transporte que cuide la integridad de la piel de los frutos.

Las tareas del campo son repetitivas, sucias e intensivas en cuanto a trabajo físico. En definitiva, labores tediosas que son susceptibles de ser robotizadas. Dentro de éstas, los mayores esfuerzos se dirigen a automatizar las actividades de laboreo, siembra, control de plagas o malas hierbas, así como el proceso de cosecha (Martínez, 2020).

Justificación e Importancia

La cosecha en la industria agrícola ha tenido varias intervenciones de la innovación tecnológica como por ejemplo la aparición de cosechadoras mecánicas automáticas de trigo, cebada, maíz que realizan su labor al cortar la planta completa y realizar una posterior selección. Por otra parte para productos donde el desbroce debe ser mínimo y el cuidado de la planta o árbol es vital, no se han desarrollado mayores avances que la provisión de herramientas especializadas a los cosechadores humanos para facilitarles alcanzar alturas elevadas, así como prevenir enfermedades laborales por tareas repetitivas o que ponen en riesgo la salud e integridad física de los obreros debido a las características de las plantas ya sean espinas, ramificaciones o fuerza necesaria para la cosecha, entre otras.

Estas necesidades nos llevan a evaluar la aplicación de tecnología de robótica blanda que permita automatizar estos procesos brindando salidas viables a la industria de la agricultura para reducir los tiempos de cosecha de sus productos mejorando el rendimiento y evitando generar en obreros y trabajadores enfermedades laborales, pudiendo fungir estos en el monitoreo de la cosecha o en el proceso de control de calidad. Existen ciertos productos como el mango, que es la tercera fruta más exportada de Ecuador, que necesitan un tratamiento especial y delicado de cosecha que pueden adoptar este concepto y aplicarlo en su proceso para mejorar los rendimientos en esta Industria que es vital para la agricultura del país (CORPEI, 2019).

A este actuador se le sumará la capacidad de distinguir los frutos color y tamaño mediante un sistema de Visión Artificial. Por ultimo y no menos importante se implementará un sistema de control de presión para que el sistema pueda brindar un agarre óptimo. Este prototipo daría inicio a una investigación que puede acercar la tecnología de la Inteligencia Artificial a la industria agrícola en uno de los procesos

vitales. Además, permitiría mejorar los tiempos de cosecha de productos delicados como son frutas para exportación y de primera calidad además de permitir mejorar aún más los tiempos de cosecha de frutas que no necesiten el cuidado en su extracción que son usadas para productos derivados.

Alcance de proyecto

Se plantea el diseño y construcción de un actuador blando accionado por medio de un circuito neumático de presión proporcional, que apoyado en un sistema de visión artificial detecte y evalúe el agarre óptimo de frutas preestablecidas, además de un sistema de control básico que permita desarrollar las acciones de agarre de manera independiente basado en la información obtenida de la retroalimentación de sensores y de visión artificial.

Los componentes mecánicos dentro del actuador blando serán una muñeca rígida, los moldes con los que se elaborarán los dedos blandos y el circuito neumático. La muñeca albergará parte del circuito neumático y los motores, la cual será diseñada con un sistema de transmisiones que le permiten rotar y ampliar el rango diametral del agarre además de posicionar los actuadores blandos (dedos), y permitir el acople de los mismos. Estos dedos blandos están conformados por cámaras de aire internas que les permiten flexionarse dependiendo de la presión administrada. Esta muñeca estará unida a un acople que servirá para fijar el actuador a manipuladores y muñecas de 3 grados de libertad para su posicionamiento.

Los diferentes actuadores y sensores se conectarán al microcontrolador. Se utilizarán 1 servomotor y un motor a pasos los cuales permitirán un desplazamiento radial de los dedos blandos dentro de la muñeca para aumentar o disminuir el diámetro de agarre y el servomotor generará una rotación de la muñeca rígida. El sensor de

presión diferencial va a indicar el valor generado una vez que la fruta haya sido agarrada por el actuador. Por otra parte, la fuente de aire comprimido estará conectada a una válvula de control de presión proporcional la cuál entregará la cantidad de presión necesaria al sistema y como tal a los dedos blandos, en función de la información entregada por el sensor de presión. Los elementos que lo requieran estarán conectados a una fuente de voltaje.

Una vez que el sistema haya sido ensamblado se procederá a probar el algoritmo de visión artificial entrenado utilizando Deep Learning. En primera instancia se trabajará con una red neuronal pre entrenada utilizando las frutas que esta dispone. En segunda instancia se entrenará a esta red neuronal para dar opción de aplicarla a frutas autóctonas del país. Junto a esto será implementado un control clásico que permitirá recopilar tanto los datos de los sensores como de la visión artificial y utilizarlos para realizar una acción más rápida y eficiente de agarre.

Objetivos

Objetivo General

- Diseñar un actuador aplicando robótica blanda para la detección y recolección de frutas.

Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un actuador blando accionado por un circuito neumático controlado mediante presión proporcional.
- Realizar pruebas del actuador y sensores de presión para disminuir la toma de señales parásitas y errores de medición.

- Elaborar un sistema de visión artificial que permita detectar frutas en una transmisión de video en vivo, basado en Deep Learning, para su clasificación y posterior recolección.
- Desarrollar un controlador clásico en lazo cerrado para el actuador con el fin de desarrollar un agarre y manipulación de manera independiente.

Capítulo II

Fundamentación Teórica

En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos sobre los cuáles se trabajarán a lo largo de la investigación además de mostrar los avances realizados a nivel nacional e internacional en esta área de estudio.

Robótica Blanda (Soft Robotics)

El comportamiento rígido de los eslabones de un mecanismo limita la funcionalidad y la adaptabilidad del mismo a aplicaciones modernas dedicadas como por ejemplo agarre firme, agarre compuesto, posicionamiento, grasping etc. Ante esta limitante se ha desarrollado una nueva línea de estudio llamada robótica blanda que atiende a los diseños orientados a imitar la naturaleza en funcionalidad y que son blandos y flexibles en sus materiales cuyo módulo de elasticidad está en el orden de $10^2 - 10^6$ Pa, es decir entre 3 y 10 órdenes de magnitud menos rígidos que los robots convencionales (Medina & Vélez, 2014).

Estos actuadores proveen al sistema de una versatilidad única al tener varios grados de libertad y permitir imitar el *bio-movimiento*. Parámetros como la rigidez, el cambio de movimiento y cambio de las propiedades superficiales permiten que se adapten procesos multivariados al mismo, pero se vuelve también una tarea compleja de sonorización. Para brindar características de movimiento, comportamiento, flexibilidad y suavidad controladas y pre establecidas se han desarrollado varios sensores, actuadores que difieren de los tradicionales en su construcción tanto de funcionalidad como de materiales que suelen ser geles y polímeros (Medina & Vélez, 2014).

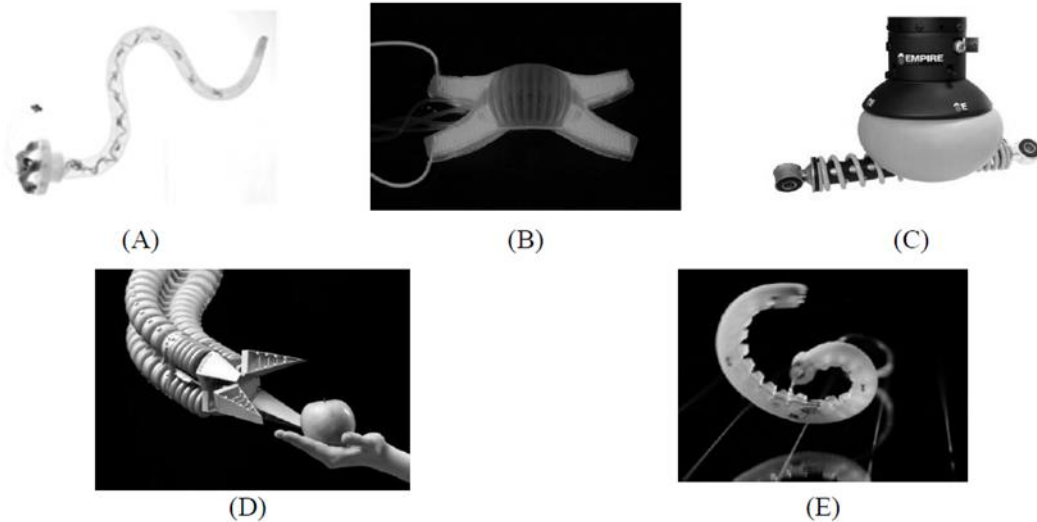
Inspiración Biológica

El concepto del actuador aterriza en un pilar fundamental de la robótica blanda denominado inspiración biológica que consiste en analizar las formas presentes en la naturaleza, sus dimensiones y su adaptabilidad a tareas complejas de alimentación y defensa, para aprovechar sus ventajas anatómicas y de estructura física. Otra fuente de inspiración para diseños es el cuerpo humano que posee varios componentes totalmente blandos como el corazón que bombea sangre por todo el sistema circulatorio aprovechando la deformabilidad de sus composición y anatomía con una fuente muscular de deformación que impulsa la sangre.

Un ejemplo del concepto de inspiración biológica son los actuadores del tipo cefalópodos que imitan la forma y el comportamiento de un pulpo siendo el posicionamiento encargado por manipuladores de características antropomórficas o en diferentes configuraciones dependiendo de la aplicación y el agarre encargado por “tentáculos” que mediante un diseño eficiente de **cámaras de aire** se cierran o se abren dependiendo de la presión de aire aplicada. En la Figura 1 se pueden observar diversos ejemplos de actuadores blandos.

Figura 1

Robots Intrínsecamente suaves



Nota. La imagen muestra a los siguientes robots: (A) Optopus Robot, (B) Starfish robot, (C) Universal Gripper, (D) Bionic Handling Assistant y (E) GoQBot (Medina & Vélez, 2014).

Los actuadores cefalópodos son neumáticos y de origen elastomérico tienen una gran aplicabilidad en el mundo de la robótica blanda. Sus formas permiten tener un movimiento no lineal. Las redes neumáticas denominadas PneuNets son una serie de canales y cámaras dentro de un elastómero que reaccionan a la aplicación de aire comprimido a cierta presión inflándose y creando un movimiento. Estos actuadores son resistentes permitiendo producir movimientos que se controlan o establecen variando la geometría de las redes internas y son movimientos de gran amplitud en ciclos repetitivos y sin fallos (Medina & Vélez, 2014).

Agarre (Grasping)

Grasping o agarre se refiere a obtener un control confiable sobre los grados de libertad extrínsecos de un objeto a través de los grados de libertad del robot. Para

realizar el agarre, los grados de libertad generales del robot han sido, tradicionalmente, dividido en dos partes: aquellos requeridas para impartir fuerzas en un objeto (generalmente abordado usando enfoques de planificación de agarre) y los restantes que se pueden utilizar para reposicionar el objeto, una vez que se obtiene un agarre (planificación general de movimiento y manipulación). Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en contraste con esta descomposición tradicional, coordinación de brazo y mano, los grados de libertad son generalmente requeridos durante el agarre (Siciliano & Khatib, 2016).

Cuando los dedos están blandos, durante la sujeción y la manipulación del objeto a través de dimensiones precisas, su propiedad de blandura mantiene el área de contacto entre las yemas de los dedos y el objeto manipulador, lo que restringe al objeto y proporciona estabilidad. En el dedo humano hay una suavidad natural que es una combinación de elasticidad y amortiguación. Esta combinación de elasticidad y amortiguación la produce la naturaleza debido a la carne y la sangre debajo de la piel. Esto mantiene el contacto firme y ayuda a sostener el objeto con firmeza y estabilidad (Khurshid & Afzaal, 2011).

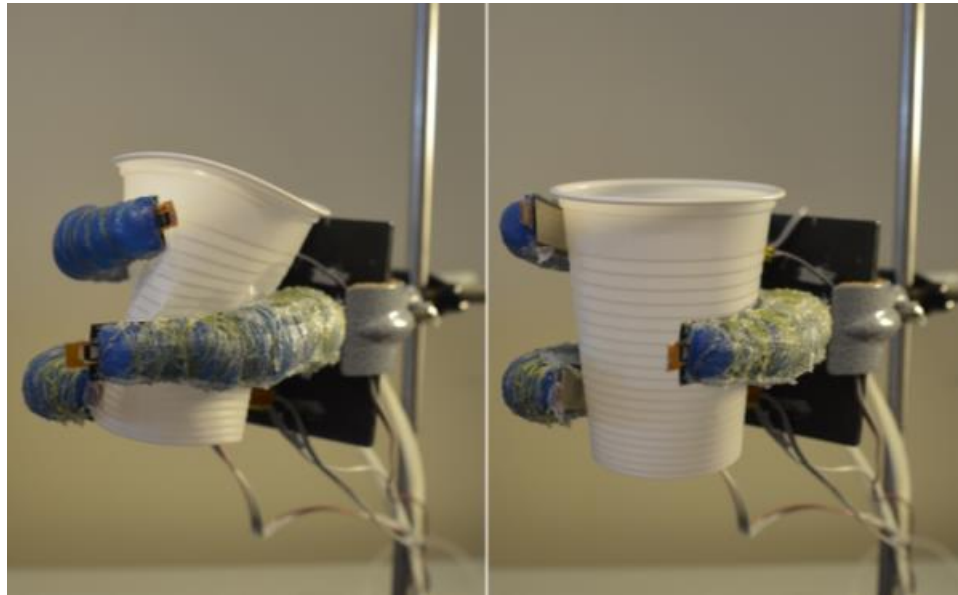
Un enfoque alternativo para diseñar actuadores blandos es el utilizar materiales que tengan características elásticas. Es así que muchos de estos actuadores son diseñados a partir de polímeros elastómeros y más recientemente con bio-materiales. El uso de estos materiales asegura que exista una menor deformación sobre los objetos en los que actúan.

Un agarre estable pero seguro requiere que una mano robótica pueda aplicar suficiente fuerza sobre el objeto objetivo para no dañarlo y a su vez inmovilizarlo. Recientemente, se han propuesto manos suaves para agarre seguro debido a su cumplimiento pasivo. Sin embargo, incluso tales manos pueden deformar objetos si la

fuerza aplicada es demasiado alta. Por tanto, es necesario controlar la fuerza de agarre también en actuadores blandos (Nguyen, Lundell, & Kyrki, 2019).

Figura 2

Exceso de fuerza de agarre



Nota. En la imagen de la izquierda se puede observar como el vaso se deforma con un exceso de fuerza. En la imagen de la derecha se observa un agarre óptimo al brindar un adecuado control de la fuerza (Nguyen, Lundell, & Kyrki, 2019).

Visión Artificial usando Aprendizaje Profundo (Deep Learning)

La visión artificial como campo tiene una larga historia. Con la aparición del Machine Learning, la visión artificial ha demostrado ser útil para diversas aplicaciones. Deep Learning es una colección de técnicas de la red neuronal artificial (ANN), que es una rama del Aprendizaje de máquinas (Shanmugamani, 2018).

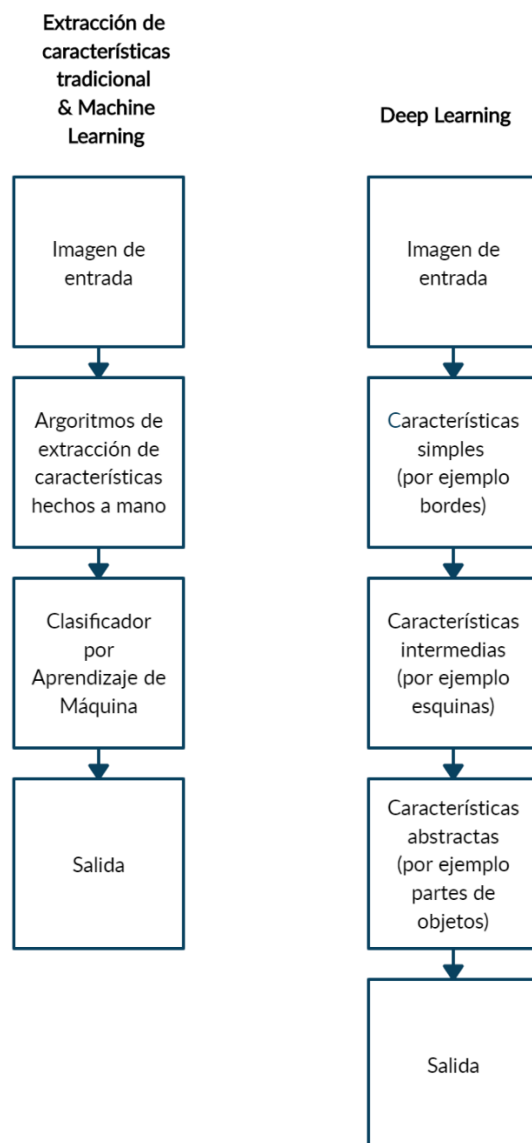
Entre los factores más destacados que contribuyeron al gran impulso del aprendizaje profundo se encuentran la aparición de conjuntos de grandes datasets, de alta calidad y disponibles públicamente, junto con el empoderamiento de la computación

GPU paralela, que permitió la transición de un entrenamiento basado en una CPU a una GPU permitiendo así una aceleración significativa en el entrenamiento de modelos profundos (Voulodimos, Doulamis, Doulamis, & Protopapadakis, 2018).

Los diferentes algoritmos de Deep Learning funcionan por medio de múltiples capas apiladas una sobre la otra permitiendo un aprendizaje jerárquico. Con los avances que han existido dentro de la computación se han podido desarrollar redes con muchas más capas permitiendo un aprendizaje mucho más profundo y por lo tanto más preciso.

Figura 3

Diferencias entre aprendizaje tradicional y aprendizaje profundo



Nota. A la izquierda se observa un proceso tradicional en el que se toma un conjunto de imágenes de entrada, se aplican algoritmos de extracción de características, seguidos del entrenamiento de un clasificador de aprendizaje automático en las características. A la derecha se observa un enfoque de aprendizaje profundo de apilar capas una encima

de la otra aprendiendo automáticamente características más complejas, abstractas y discriminatorias (Rosebrock, 2017).

Los problemas más comunes que surgen en la visión artificial y pueden ser resueltos usando algoritmos de Deep Learning son:

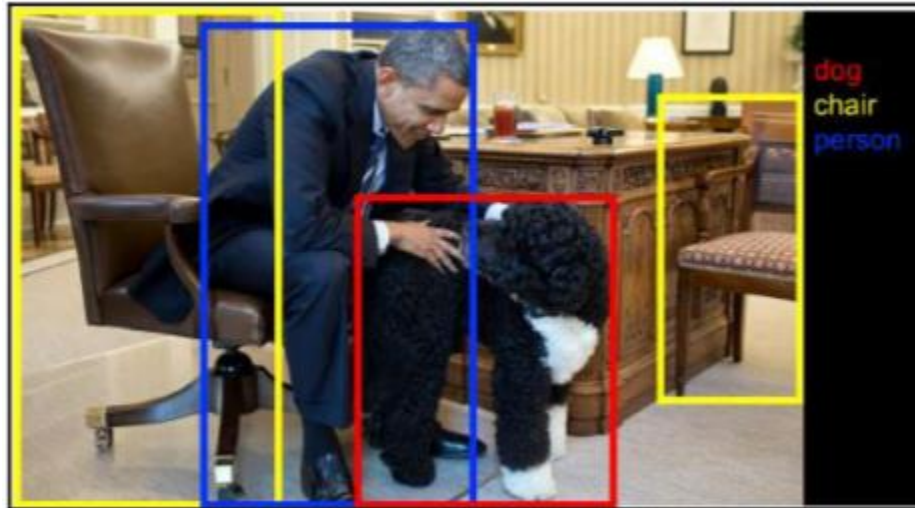
- Clasificación
- Detección o localización y segmentación
- Aprendizaje de similitud
- Subtitulo de imagen
- Modelos Generativos
- Análisis de videos

Detección o localización de objetos

La clasificación de imágenes etiqueta la imagen como un todo. Encontrar la posición del objeto, además de etiquetar el objeto se llama localización de objetos. Por lo general, la posición del objeto se define mediante coordenadas rectangulares. Encontrar múltiples objetos en la imagen con las coordenadas rectangulares se le conoce como detección (Shanmugamani, 2018).

Figura 4

Detección de Objetos



Nota. En la figura se puede apreciar un ejemplo de detección de objetos, en donde se observan cuatro objetos, detectados y encerrados en una caja con su respectiva etiqueta (Shanmugamani, 2018).

Modelos de la familia “You Only Look Once” (YOLO)

YOLO es un acrónimo para “You Only Look Once” que significa solo miras una vez. Esta familia de modelos fue desarrollada por Joseph Redmon. Una de las ventajas que presenta YOLO es la posibilidad de realizar una detección de objetos en tiempo real. YOLO fue lanzado en el año 2015 y desde entonces ha recibido una serie de mejoras y actualizaciones las cuales reciben los siguientes nombres:

- YOLO
- YOLOv2
- YOLO9000
- YOLOv3

Anteriores trabajos en la detección de objetos reutilizan los clasificadores para realizar la detección. En su lugar, YOLO enmarca la detección de objetos como un problema de regresión enfocado en cuadros delimitadores espacialmente separados y probabilidades de clase asociadas. Una única red neuronal predice cajas delimitadores y probabilidades de clase directamente de imágenes completas en una evaluación (Redmon, Divvala, Girshick, & Farhadi, 2016).

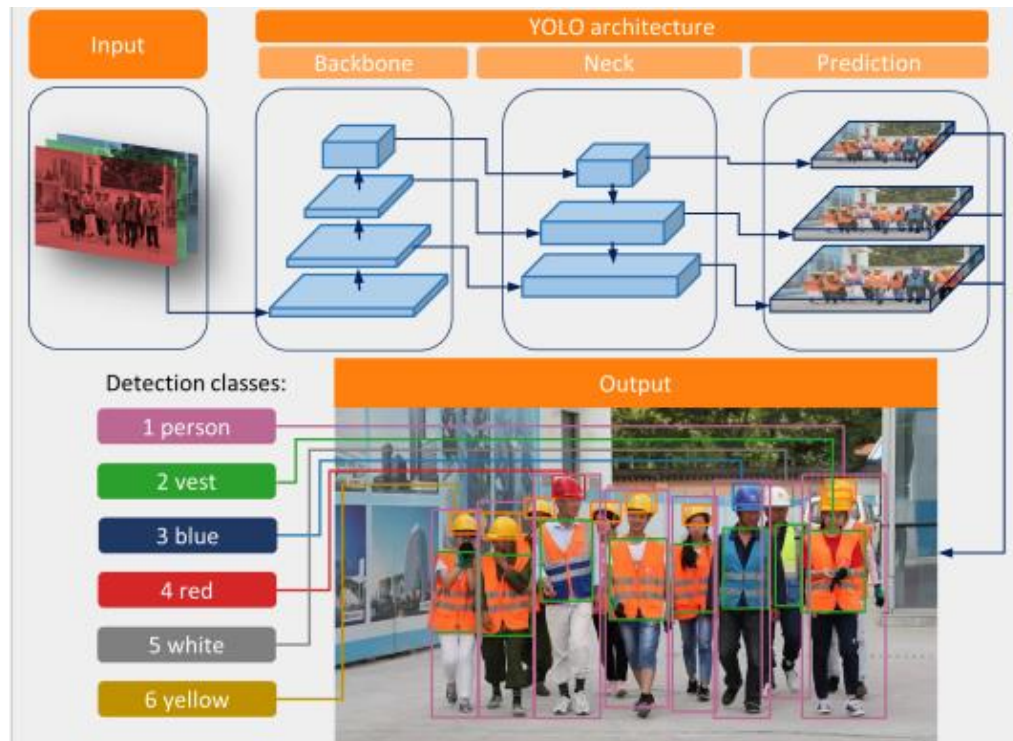
YOLO funciona dividiendo la imagen en una cuadrícula de $S \times S$, en donde cada celda de la cuadrícula predice un número de cuadros delimitadores B , un porcentaje de confianza para estos cuadros y probabilidades de clase C (Redmon, Divvala, Girshick, & Farhadi, 2016).

De esta forma, se trabajará con un tensor de la forma:

$$S \times S \times (B * 5 + C)$$

El valor de B es obtenido a partir del dataset con el que se entrenó a YOLO. El valor de C corresponde al número de clases etiquetadas que posee.

En la Figura 5 se puede observar de una manera general como se encuentra constituida la red de YOLO. Esta red se encuentra dividida en 3 partes denominadas columna, cuello y cabeza. La columna se encuentra conformada por una red neuronal convolucional que se encarga de obtener las formas y características de las diferentes imágenes. El cuello está conformado por varias capas encargadas de mezclar y combinar características obtenidos a partir de las imágenes y enviarlas a la cabeza. La cabeza se encarga de realizar las tareas de predicción.

Figura 5*Arquitectura de YOLO*

Nota. En la figura se puede apreciar las diferentes partes que componen a YOLO (Wang, y otros, 2021)

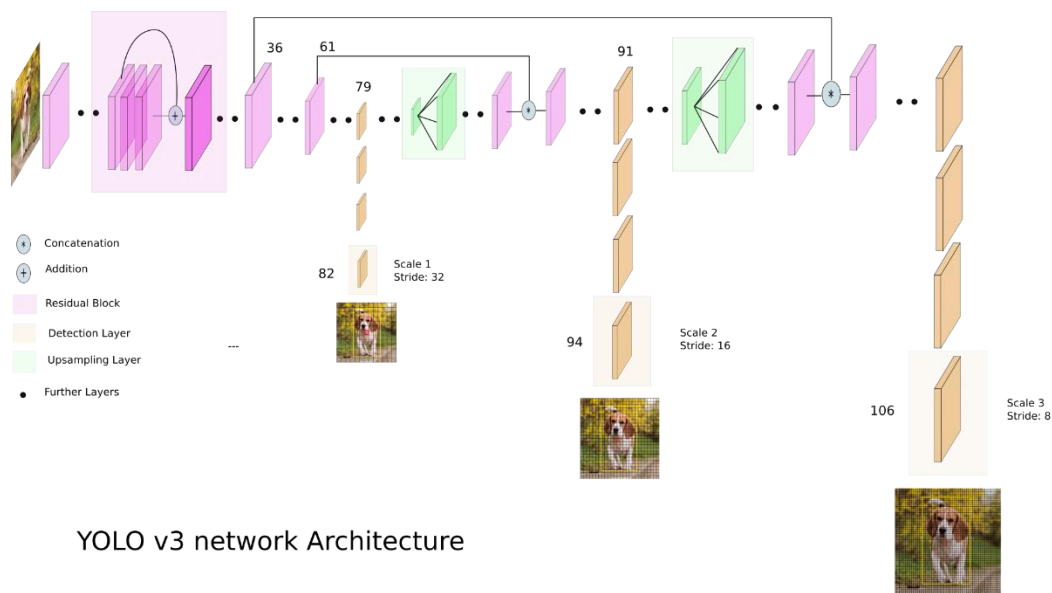
La primera versión de YOLO tiene una velocidad de procesamiento de 45 fotogramas por segundo y trabaja con un total de 20 clases etiquetadas. Además, su arquitectura de red para la detección está compuesta por 24 capas convolucionales seguidas de 2 capas completamente conectadas.

La versión 3 de YOLO decidió incrementar su exactitud aumentando la complejidad de su arquitectura de red. Para ello se trabajó con la red neuronal Darknet, como su columna, incrementando el número de capas convolucionales a 106. El resultado de esto es que existe una disminución en su velocidad de procesamiento a 30 fotogramas

por segundo, pero incrementa su capacidad de detección, especialmente en objetos pequeños.

Figura 6

Arquitectura de YOLOv3



YOLO v3 network Architecture

Nota. YOLO v3 hace predicciones en tres escalas, que se dan con precisión reduciendo las dimensiones de la imagen de entrada en 32, 16 y 8, en las capas 82, 94 y 106 respectivamente. Esta reducción de tamaño en la imagen permite detectar objetos de diferentes tamaños (Kathuria, 2018).

Debido a cuestiones personales y éticas Joseph Redmond decidió terminar todas sus investigaciones en el área de visión artificial. Diversos equipos de investigación han decidido continuar con el trabajo de YOLO, dando como resultado a las versiones YOLOv4 y YOLOv5, desarrollados por Alexey Bochovski y Glenn Jocher, junto a la empresa Ultralytics, respectivamente.

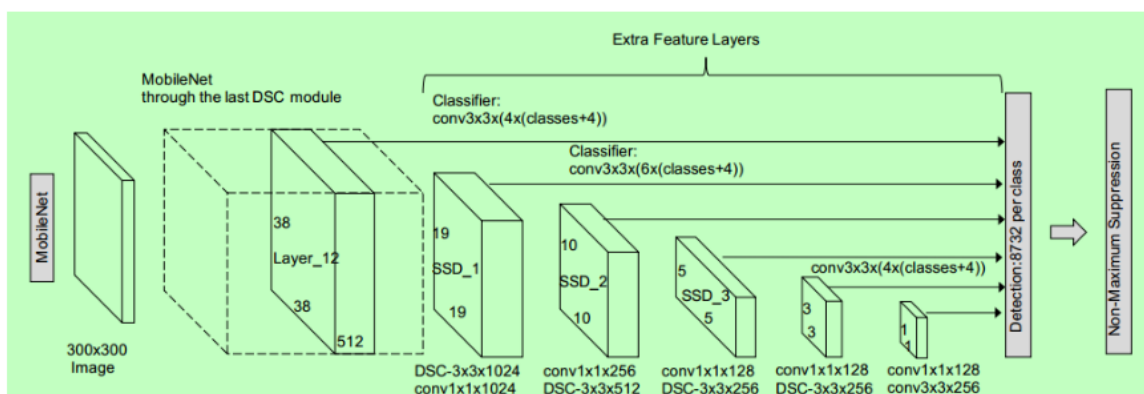
Nota. Las arquitecturas de YOLOv4 y YOLOv5 son similares (Wang, y otros, 2021).

SSD MobileNet

La arquitectura SSD es una red de convolución única que aprende a predecir las ubicaciones de los cuadros delimitadores y a clasificar estas ubicaciones en una sola pasada. Por lo tanto, SSD se puede entrenar de un extremo a otro. La red SSD consta de una arquitectura base (MobileNet en este caso) seguida de varias capas convolucionales (Singhal, 2020).

Figura 8

Arquitectura de SSD MobileNet



Nota. Detección basada en SSD utilizando MobileNet como base (Singhal, 2020).

Al utilizar SSD solo se necesita tomar una captura para detectar múltiples objetos dentro de la imagen. Esto causa que SSD sea mucho más rápido que otros detectores permitiendo que sea utilizado en aplicaciones móviles y en sistemas embebidos.

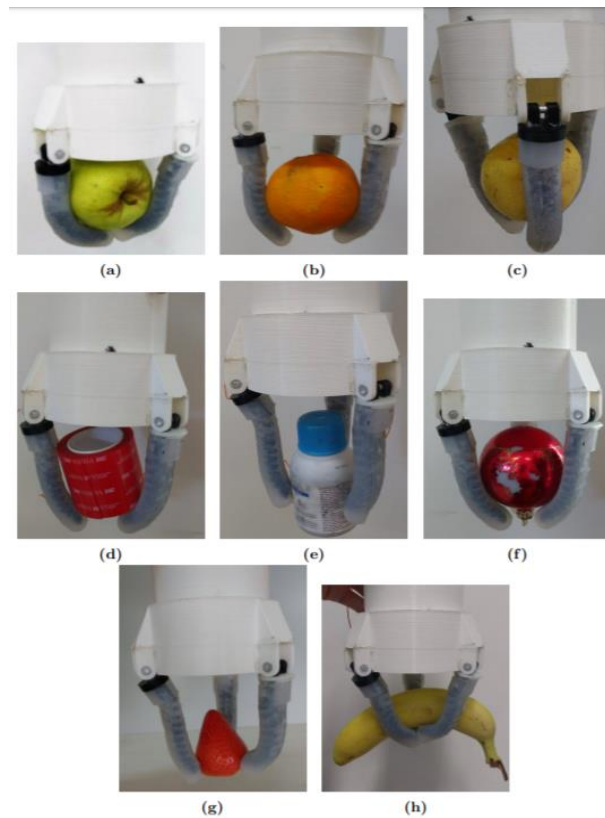
Estado del arte

Una parte importante en el diseño, construcción y estudio de actuadores robóticos es el poder generar un agarre óptimo, sin que exista un daño, sobre el elemento en el que va a trabajar. Con la aparición de la robótica blanda se dio lugar a un nuevo enfoque. Estos actuadores reciben el nombre de actuadores blandos.

La forma de estos actuadores blandos busca imitar el comportamiento de los dedos del ser humano. João Guilherme Alves Santos de la Universidad de Coímbra en Portugal desarrolló un dedo innovador que busca imitar la fisiología de un dedo humano biológico. Este dedo blando está hecho de un núcleo impreso en 3D para sustituir el endoesqueleto de los dedos, una piel de elastómero de silicona para sustituir el elástico y una capa epidérmica resistente junto a un relleno de hidrogel para sustituir la capa dérmica. Para poder probar el funcionamiento se desarrolló un prototipo de bajo costo de una pinza en donde se acoplaron 3 de estos dedos. La pinza trabaja con un mecanismo basado en los juguetes con una base de empuje. Este mecanismo es accionado por medio de un motor. Las pruebas fueron realizadas en diferentes frutas definiendo la fuerza necesaria para cargarlas asegurándose que los objetos no causen deterioro en los materiales con los que se construyeron los dedos (Alves, 2017).

Figura 9

Pruebas finales del actuador de João Alves



Nota. El nombre de la tesis es “Bio-inspired robotic gripper with hydrogel-silicone soft skin and 3D printed endoskeleton” (Alves, 2017).

Los actuadores blandos son generalmente construidos a partir de polímeros elastómeros dándoles a estos un comportamiento elástico, implicando que estos puedan deformarse. Esto ha dado lugar a que en muchos casos se deje de lado un adecuado control en la fuerza que estos actuadores ejercen sobre el elemento a agarrar.

Tran Nguyen Le de la Universidad de Tampere en Finlandia buscó dar una solución a esto. Nguyen construyó su propia pinza con 3 actuadores blandos a los cuales les agregó 2 sensores; un sensor de flexión y un sensor de fuerza. Los

actuadores blandos funcionan por medio de un circuito neumático. La información extraída de las lecturas sensoriales se utilizó para desarrollar una estrategia de control y estudiar la interacción entre la mano y los objetos. Los resultados finales mostraron que esta información podría ser utilizada para controlar con éxito la mano suave en tiempo real para lograr una tarea de manipulación y agarrar objetos de planos deformables como los vasos plásticos (Nguyen Le, 2019).

Figura 10

Control de Fuerza en Actuadores Blandos



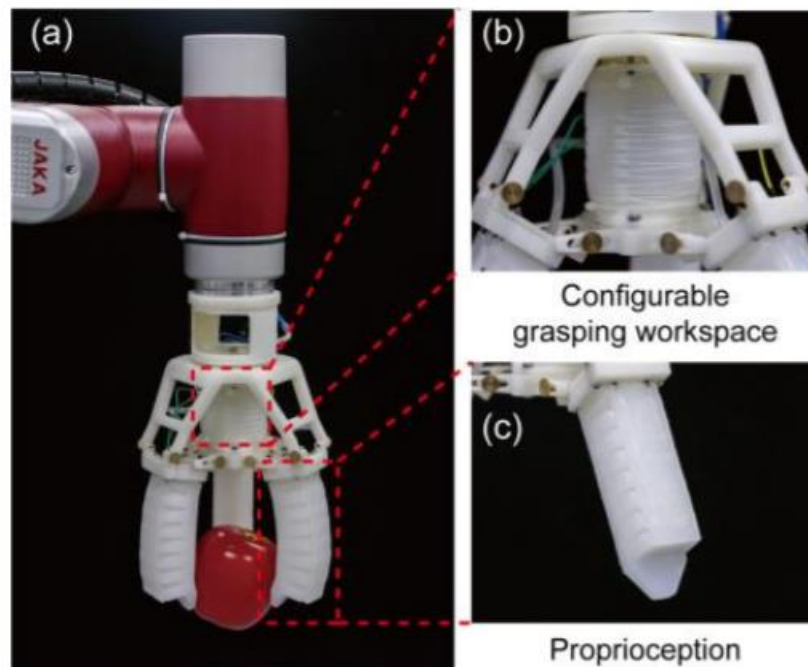
Nota. (a) Los objetos escogidos para el experimento: un vaso plástico vacío, un vaso de papel vacío, cáscara de huevo vacía (izquierda a derecha). (b) La disposición de la mano blanda para el experimento. El nombre de la tesis es “Force Control for Soft Robotic Hands Applied to Grasping” (Nguyen Le, 2019).

En relación a esto, el equipo de trabajo de la Universidad Shanghai Jiao Tong desarrollaron un gripper (pinza) neumático que permite agarrar diferentes objetos y reconocer su tamaño utilizando sensores de deformación por medio de 2 estrategias de control que permitió incorporar capacidades de autodetección. La primera estrategia

recibe el nombre de “Identificación por dedos doblados” (FBI) y la segunda “Identificación por palma cerrada” (PCI). Los resultados experimentales indican que la estrategia PCI permite realizar tareas de agarre más robustas que con la FBI (Shao, Zhang, Shen, & Gu, 2020).

Figura 11

Gripper blando acoplado a un robot industrial



Nota. (a) La pinza levanta una manzana de juguete. (b) El actuador reforzado con fibra montado en la palma permite pellizcar los dedos. (c) Un dedo suave con sensor de deformación. El nombre de la investigación es: “A Pneumatic Soft Gripper with Configurable Workspace and Self-sensing” (Shao, Zhang, Shen, & Gu, 2020).

A la final, un adecuado diseño de los actuadores blandos junto a un adecuado control permitirá que estos se puedan acoplar en brazos robóticos para realizar diferentes tareas.

Un ejemplo de esto es en el trabajo conjunto de las Universidades de Plymouth y Shanghai Jiaotong, y las compañías Shanghai Sunqiao Modern Agricultural United Development Company y Fieldwork Robotics Ltd. Este equipo de trabajo construyó un robot con un manipulador blando para la recolección selectiva de tomates. Las pruebas fueron realizadas en tallos artificiales en Shangay y en invernaderos en Reino Unido. El sistema robótico presentado consta de un brazo manipulador de rigidez variable, una pinza robótica suave y diferentes tipos de sensores que se utilizan para identificar y localizar en 3D y recoger los tomates (Mohamed, y otros, 2019).

Figura 12

Pruebas del robot recolector de tomates



Nota. Disposición del experimento en (a) China, (B) Reino Unido, (C) Laboratorio (Mohamed, y otros, 2019).

Por otra parte, las aplicaciones de los actuadores blandos no se quedan atrás en la industria. La empresa “Soft Robot Tech” (SRT) de Beijing se dedica al diseño, manufactura y tecnologías de control para robots blandos, enfocándose en áreas del mercado para realizar acciones de agarre y empaquetamiento de objetos frágiles. La

empresa cuenta con diferentes certificaciones globales y cuenta con varias oficinas a nivel mundial, trabajando con empresas como Delta, Schneider, Valeo, Bosch, entre otras (Beijing Soft Robot Tech, 2019).

Figura 13

Actuador de SRT



Nota. La imagen muestra diferentes modelos ofrecidos por la empresa SRT (Beijing Soft Robot Tech, 2019).

Los actuadores blandos también han servido como una fuente de inspiración para Hollywood. El doctor Christopher G. Atkeson y sus trabajos en el área de la robótica blanda, especialmente sus actuadores blandos, influenciaron al diseño del personaje Baymax en la película "Big Hero 6". Gracias al éxito de la película, el, junto a su equipo de trabajo decidieron construir a dicho personaje para aplicaciones en el área social. El equipo de trabajo se encuentra trabajando bajo donaciones. El diseño de estos actuadores nace de robots blandos inflables que pueden realizar diferentes tareas de agarre (Build Baymax, 2014).

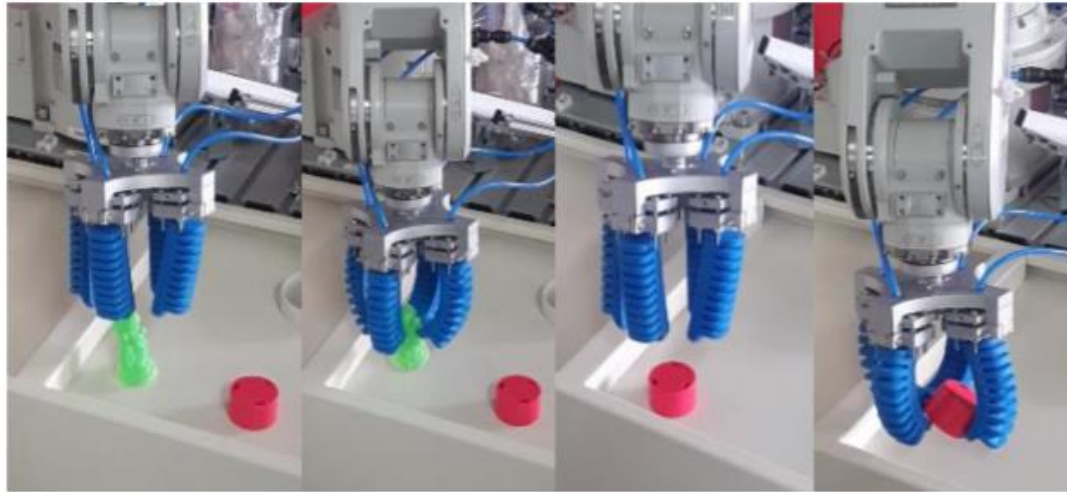
Figura 14*Actuador Inflable blando*

Nota. Actuador blando que inspiró al diseño y construcción de Baymax (Build Baymax, 2014).

En el Ecuador, más específicamente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, los ingenieros Xavier Alejandro Naranjo Vallejo y Jossbell Fabián Tello Cordones diseñaron su propio actuador blando para que sea implementado en el brazo robótico Mitsubishi. El sistema permite manipular objetos con geometrías irregulares y consta de un módulo destinado a desarrollar la clasificación de cada uno de los objetos manipulados. La pinza flexible es netamente neumática y consigue realizar la clasificación de objetos utilizando algoritmos de visión artificial (Naranjo & Tello, 2017).

Figura 15

Pruebas finales con el actuador blando



Nota. El nombre de la tesis es “Diseño e implementación de una pinza flexible basado en la tecnología de robótica blanda para manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular implementado en el brazo robótico Mitsubishi del laboratorio de mecatrónica” (Naranjo & Tello, 2017).

Vale recalcar que la anterior tesis es la única investigación de este tipo en actuadores blandos dentro del Ecuador.

Con la información expuesta en este estado del arte y conociendo el estado actual de las investigaciones en actuadores blandos se plantea realizar el siguiente proyecto con el deseo de aportar a las presentes y futuras investigaciones, haciendo hincapié en las estrategias de visión artificial y control inteligente.

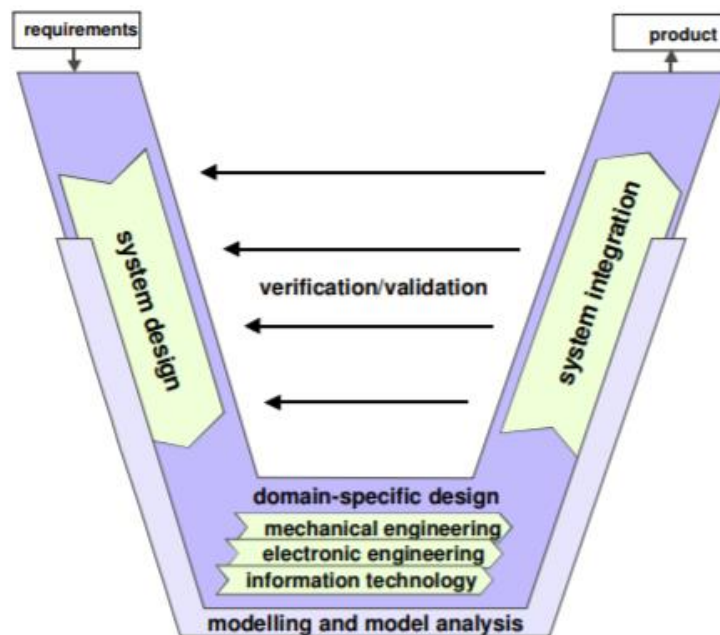
Capítulo III

Desarrollo del Sistema

Para la presente tesis se seguirá el modelo de Procedimientos Flexibles para el Diseño de Sistemas Mecatrónicos incluido en la Norma VDI 2206. El modelo presenta un procedimiento flexible en el que se toman en cuenta las necesidades específicas de un diseño mecatrónico. El proceso de diseño genérico estará relacionado a las fases de diseño y los correspondientes estados del producto, conocido como nivel macro, el cual va a ser validado mediante el modelo “V”.

Figura 16

Modelo en V



Nota. El presente modelo responde a un nivel macro (Gausemeier, Moehring, & Stefan, 2003).

El modelo “V” es la metodología de trabajo más óptima ya que demanda la necesidad de una permanente validación y verificación entre los requerimientos y funciones, y el sistema a diseñar. Además, el modelo es usado en la industria en el contexto de la mecatrónica.

Acompañado de la norma VDI 2206 se utilizará la herramienta conocida como Casa de la Calidad o House of Quality. Esta herramienta es utilizada en el diseño de productos y tiene como objetivo relacionar e interpretar los requerimientos de un cliente o sistema con los requerimientos técnicos del producto. Los requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos pueden observarse en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

Tabla 1

Requerimientos del sistema

| No | Importancia | Requerimientos del Sistema |
|----|-------------|---|
| 1 | 10 | Manipulación delicada de frutas |
| 2 | 6 | Semejanza antropomórfica |
| 3 | 5 | Accesibilidad financiera |
| 4 | 2 | Facilidad de uso |
| 5 | 9 | Recolección rápida de frutas |
| 6 | 4 | Portable |
| 7 | 3 | Facilidad de manufactura |
| 8 | 1 | Interacción con las personas |
| 9 | 7 | Sistema abierto a actualizaciones continuas |
| 10 | 8 | Adaptarse a las condiciones de las frutas |

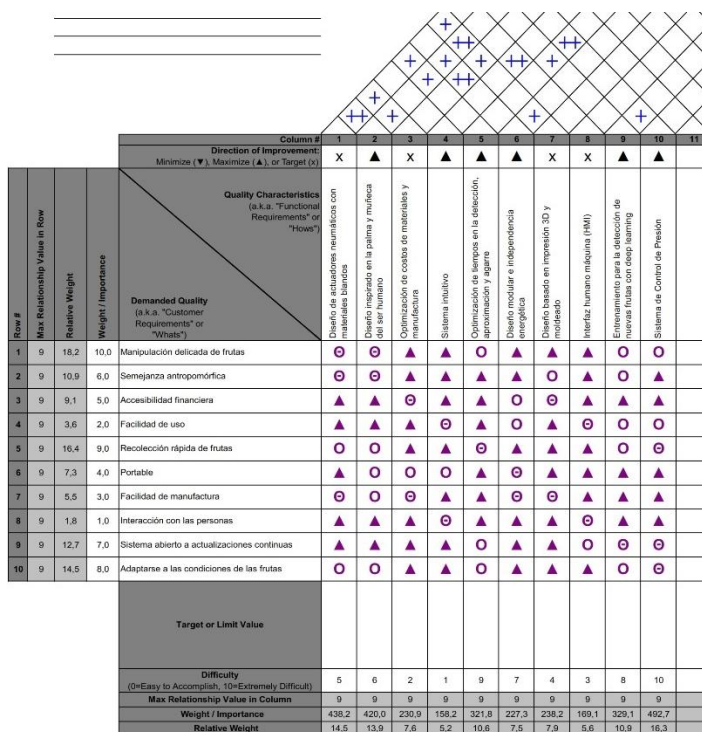
Tabla 2*Requerimientos técnicos del producto*

| No | Requerimientos Técnicos |
|----|--|
| 1 | Diseño de actuadores neumáticos con materiales blandos |
| 2 | Diseño inspirado en la palma y muñeca del ser humano |
| 3 | Optimización de costos de materiales y manufactura |
| 4 | Sistema intuitivo |
| 5 | Optimización de tiempos en la detección, aproximación y agarre |
| 6 | Diseño modular e independencia energética |
| 7 | Diseño basado en impresión 3D y moldeado |
| 8 | Interfaz humano máquina (HMI) |
| 9 | Entrenamiento para la detección de nuevas frutas con Deep Learning |
| 10 | Sistema de Control de Presión |

Una vez establecidos los requerimientos se procede a realizar la Casa de la Calidad en donde se descubrirá, en porcentaje, el peso o importancia que tiene cada uno de los requerimientos técnicos sobre el producto.

Figura 17

Casa de la Calidad del proyecto



Nota. En el Anexo 1 se encuentra una copia de la Casa de la Calidad realizada

En la Tabla 3 se pueden observar los resultados de la Casa de la Calidad.

Tabla 3

Peso Relativo para los requerimientos técnicos

| No | Requerimientos Técnicos | Peso Relativo |
|----|--|---------------|
| 1 | Diseño de actuadores neumáticos con materiales blandos | 14.5 |
| 2 | Diseño inspirado en la palma y muñeca del ser humano | 13.9 |
| 3 | Optimización de costos de materiales y manufactura | 7.6 |
| 4 | Sistema intuitivo | 5.2 |
| 5 | Optimización de tiempos en la detección, aproximación y agarre | 10.6 |

| No | Requerimientos Técnicos | Peso Relativo |
|----|--|---------------|
| 6 | Diseño modular e independencia energética | 7.5 |
| 7 | Diseño basado en impresión 3D y moldeado | 7.9 |
| 8 | Interfaz humano máquina (HMI) | 5.6 |
| 9 | Entrenamiento para la detección de nuevas frutas con Deep Learning | 10.9 |
| 10 | Sistema de Control de Presión | 16.3 |

Para facilitar la realización y análisis del proyecto, además de cumplir con la norma VDI 2206, se va a dividir la investigación en subsistemas. Estos subsistemas van a funcionar a manera de módulos que van a trabajar entre si con el objetivo de que al final exista una relación entre todos y se puedan cumplir los objetivos del presente proyecto.

Cada subsistema va a estar relacionado con alguna característica técnica que deben cumplir. En la Tabla 4 se observan los subsistemas a desarrollarse.

Tabla 4

Subsistemas del Proyecto

| No | Subsistema | Requerimiento Técnico |
|----|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | Hardware Mecánico | 1, 2, 3, 6, 7 |
| 2 | Sistema de Control de Presión | 5, 10 |
| 3 | Hardware Electrónico | 3, 5, 6 |
| 4 | Sistema de Visión Artificial | 4, 5, 9 |
| 5 | TICs | 4, 8 |

A lo largo de la investigación va a ser necesario realizar una selección de materiales o conceptos. Para poder realizar una correcta selección se va a utilizar una metodología de 2 etapas para la selección de conceptos propuesta en el libro “Diseño y Desarrollo de Productos” de Ulrich & Eppinger.

La primera etapa se denomina filtrado de conceptos y la segunda, evaluación de conceptos. Cada una se apoya en una matriz de decisiones que utiliza el equipo para filtrar, ordenar y seleccionar los mejores conceptos. El filtrado es una evaluación rápida y aproximada destinada a producir algunas alternativas viables. La evaluación es un análisis más cuidadoso de estos relativamente pocos conceptos con el propósito de escoger el concepto individual que tenga más probabilidad de llevar el producto al éxito (Ulrich & Eppinger, 2013).

Las 2 etapas siguen un proceso de 6 pasos, siendo estos:

- Elaborar la matriz de selección
- Evaluar los conceptos
- Ordenar los conceptos
- Combinar y mejorar los conceptos
- Seleccionar uno o más conceptos
- Reflexionar sobre los resultados y el proceso

Desarrollo de Hardware mecánico

El subsistema de hardware mecánico engloba todos los requerimientos mecánicos del proyecto como lo son los actuadores blandos, el sistema neumático y la muñeca en donde se van a acoplar los actuadores blandos. Los diseños van a ser realizados en un programa CAD para después ser construidos e implementados en el proyecto.

Diseño y construcción del actuador blando

Los actuadores blandos van a ser los encargados de agarrar las diferentes frutas que se le presenten. El diseño de los actuadores blandos permitirá cumplir con criterios

que aseguren que va a realizar la acción de agarre de una manera efectiva para finalmente llevar a cabo su construcción e implementación.

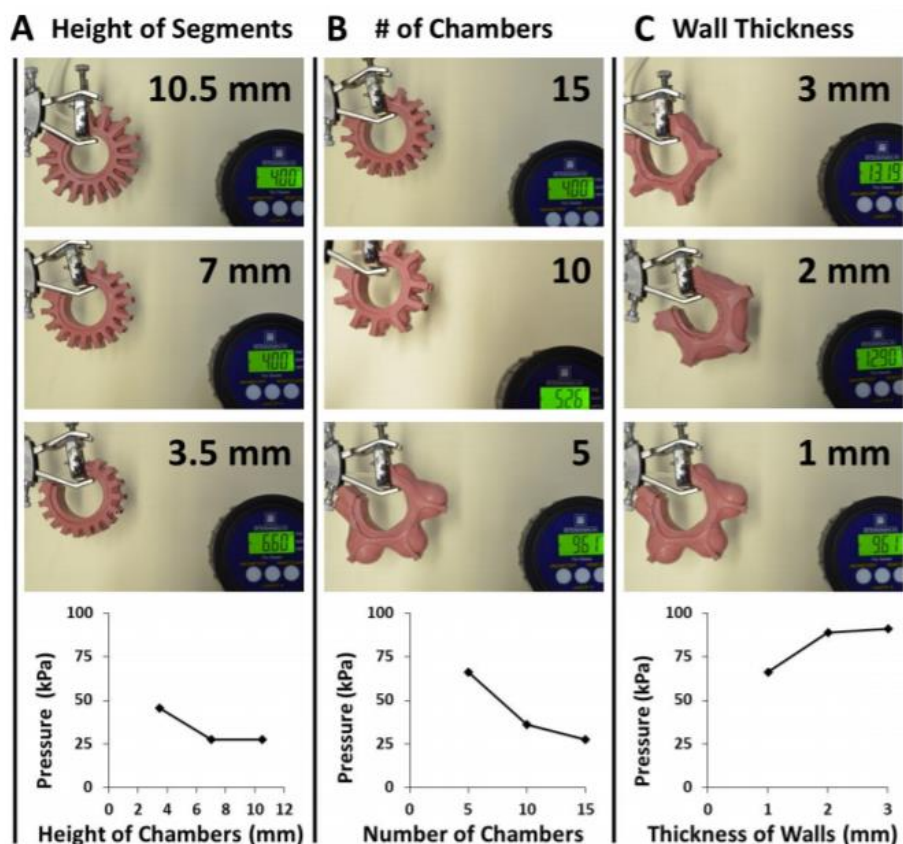
Criterios de selección de morfología

La morfología de los actuadores blandos va a influir en varias de sus funcionalidades como la velocidad de acción, fuerza generada, presión requerida para doblarse, entre otros. Es así que es necesario realizar un diseño considerando su morfología. Con este propósito, a continuación, se hará referencia a los resultados obtenidos por dos investigaciones sobre la morfología de los actuadores blandos.

En el artículo “Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly” el equipo de trabajo realizó una serie de pruebas para demostrar como el cambio en la altura de las cámaras de aire, el número de cámaras de aire y el espesor de las paredes afectan en la presión requerida para doblarse. Sus resultados indican que incrementar la altura de las cámaras de aire, hasta cierto punto, reduce la presión requerida. Incrementar el número de cámaras de aire también disminuirá la presión requerida. Por otra parte, aumentar el espesor de las paredes causará un aumento de la presión requerida.

Figura 18

Presión requerida para doblar completamente el actuador



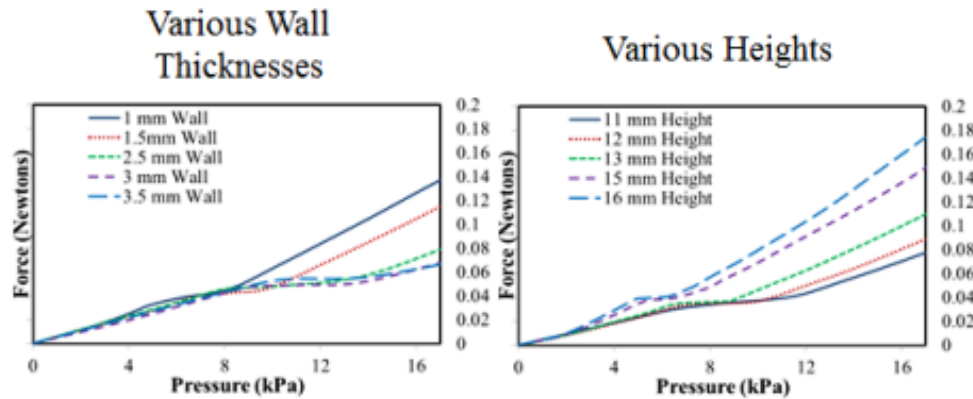
Nota. Todas las pruebas fueron realizadas con una longitud fija. A) Variación de la altura de cámara con un número constante de cámaras (15) y espesor de las paredes interiores de la cámara (1 mm). B) Variación del número de cámaras con una altura constante de cámaras (7 mm) y espesor de pared (1 mm). C) Variación del espesor de las paredes interiores con altura constante de cámaras (10,5 mm) y número de cámaras (5) (Mosadegh, y otros, 2013).

En relación a esto el equipo de trabajo del artículo “Towards a Soft Pneumatic Glove for Hand Rehabilitation” investigó como el cambio de la morfología de los actuadores influyen en la fuerza de salida generada por estos mismos. Sus resultados

indican que un espesor de pared delgado genera una mayor fuerza. Aumentar la altura de las cámaras de aire también incrementará a fuerza generada.

Figura 19

Fuerza generada con diferentes morfologías



Nota. Se mantuvo una longitud constante para todas las pruebas (Polygerinos, y otros, 2013).

Tomando en consideración estas investigaciones los criterios para determinar la morfología del actuador blando van a ser el número de cámaras de aire, la altura de las cámaras de aire y el espesor de la pared. Estas consideraciones serán tomadas en cuenta para el diseño CAD de los actuadores blandos.

Selección dimensional y diseño geométrico CAD del actuador blando

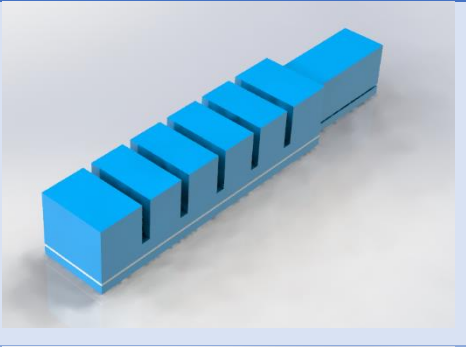
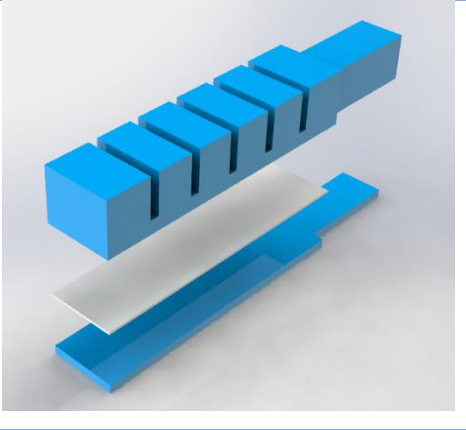
Tomando como referencia las anteriores consideraciones se decidió construir un actuador blando con 6 cámaras de aire, una altura de 10mm en cada cámara de aire y un espesor de pared interna de 2mm. Los actuadores blandos resultantes van a tener el tamaño adecuado para poder realizar una acción de agarre segura a las frutas sin que estos sean demasiado largos, ni que requieran valores elevados de presión para que

puedan doblarse. Con estas medidas y utilizando la herramienta CAD de SolidWorks se diseñaron los actuadores blandos.

En la Tabla 5 se puede observar el resultado final de los actuadores blandos diseñados.

Tabla 5

Diseño CAD del actuador blando

| Descripción | Figura |
|---|--|
| <p>Actuador blando diseñado. Se agregó una entrada en donde será acoplado</p> |  |
| <p>Por recomendación es necesario agregar un material aislante entre las 2 cubiertas con el objetivo de evitar expansiones no deseadas. El material aislante es un papel. Sobre el papel será colocado un sensor de fuerza.</p> |  |

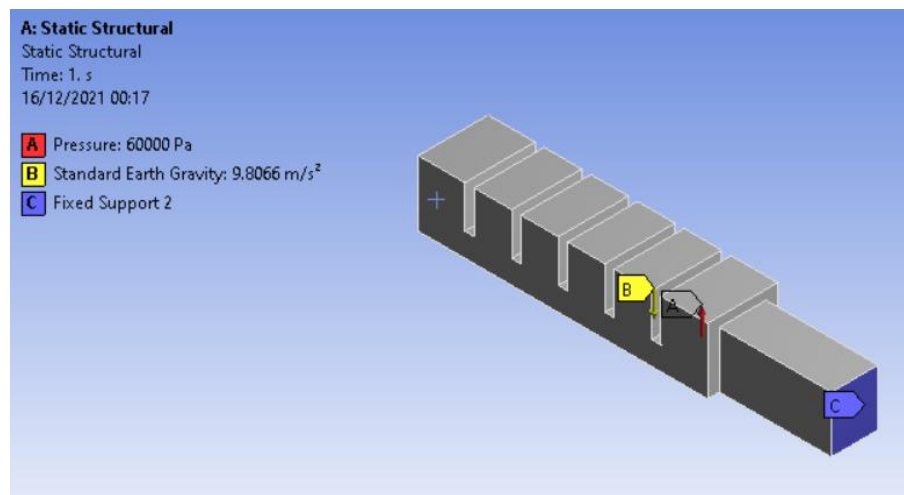
Análisis CAE del actuador blando

El análisis permitirá determinar cómo se va a comportar el actuador blando frente a una presión de trabajo máxima. Para la simulación se utilizará como material un elastómero de muestra obtenido de las librerías de materiales hiperelásticos de ANSYS.

En la Figura 20 se observa las cargas aplicadas junto al soporte fijo. El soporte fijo va a existir en uno de los extremos del actuador debido a que en esa zona se va a acoplar a la entrada de aire. Se considera la gravedad ya que es una de las fuerzas que el actuador blando deberá superar para doblarse. Finalmente se aplicará una presión de 60 [KPa] en las válvulas interiores del actuador blando, considerando que con este valor el actuador obtuvo su máxima deformación.

Figura 20

Cargas aplicadas al Actuador Blando



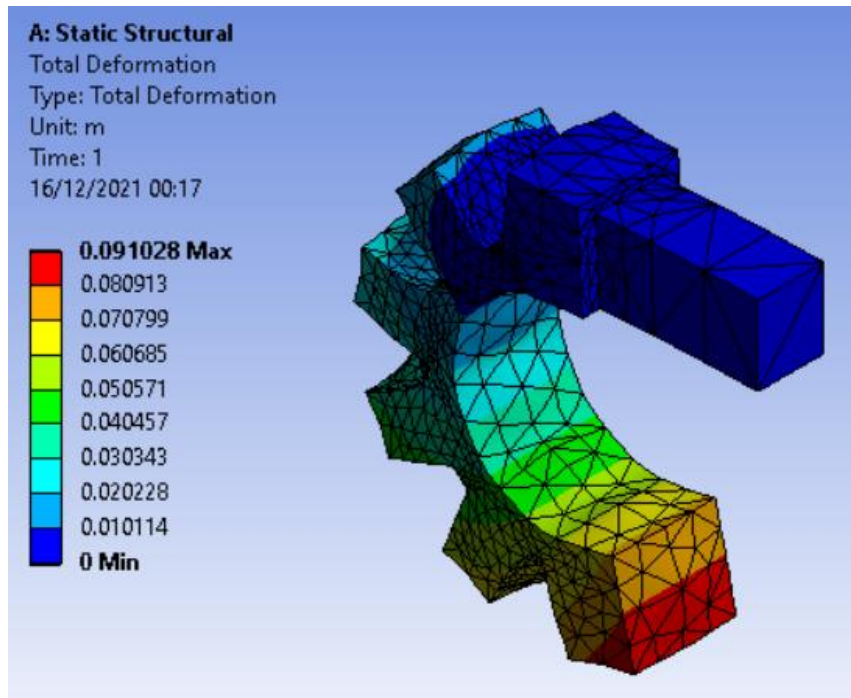
Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación.

- Estado de Deformación

En la Figura 21 se puede observar que el actuador alcanza una deformación máxima de 91.028 [mm] en el extremo que no se encuentra apoyado. Se observa que el actuador se ha doblado completamente.

Figura 21

Estado de Deformación del Actuador Blando

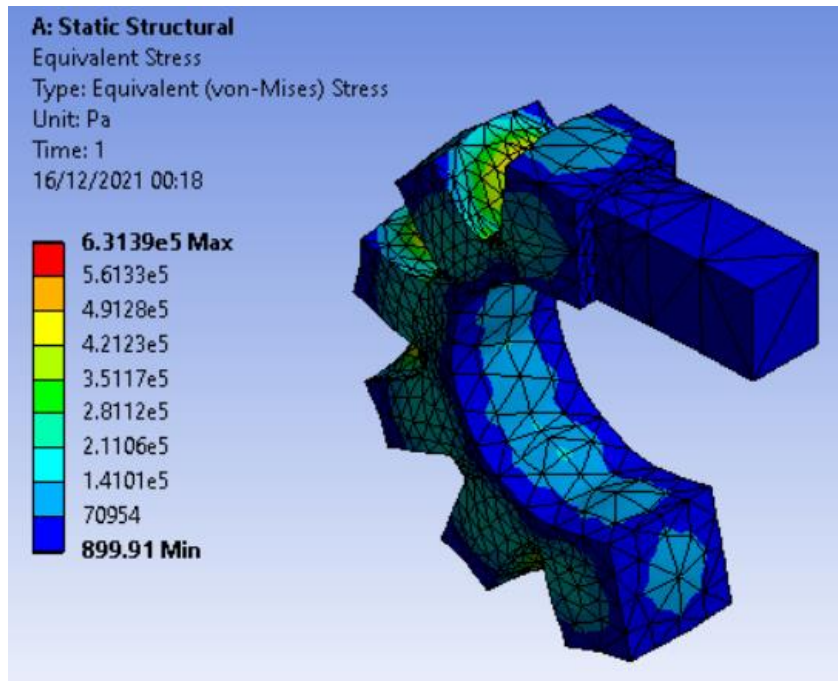


- Tensión de Von-Mises

Como se puede observar en la Figura 22 el actuador blando alcanza una Tensión Máxima de Von-Mises de 631.39 [KPa].

Figura 22

Tensión equivalente de Von-Mises del Actuador Blando

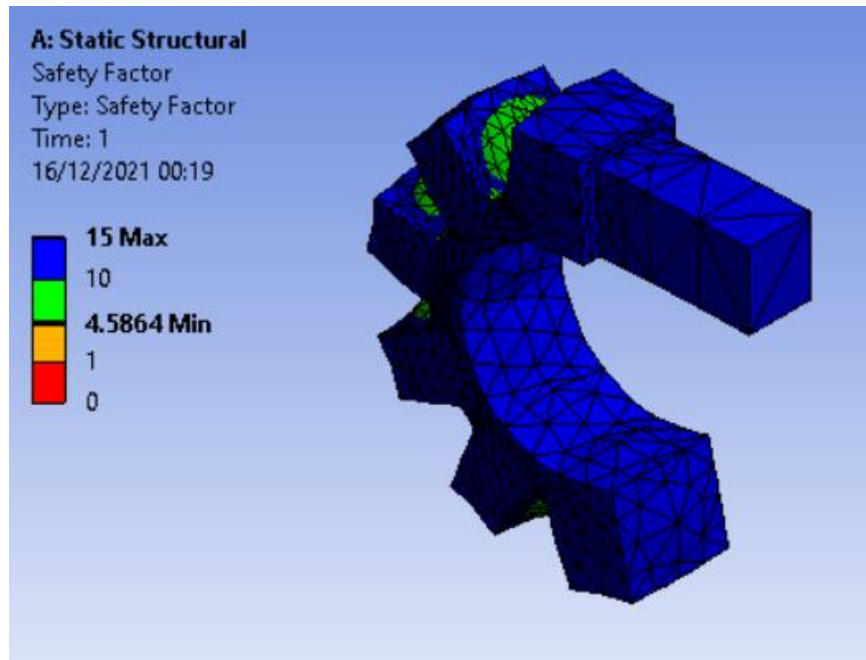


- Factor de Seguridad

Como se puede observar en la Figura 23 el actuador blando obtuvo un F.S. máximo de 15 y mínimo de 4.5864.

Figura 23

Factor de Seguridad del Actuador Blando

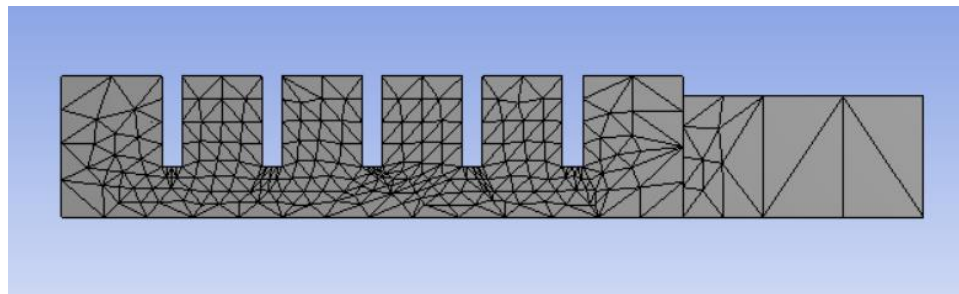


- Análisis de Malla

El mallado del actuador blando fue realizado considerando 27902 elementos y 42254 nodos. El mallado puede observarse en la Figura 24.

Figura 24

Mallado del Actuador Blando



En la Figura 25 se puede observar que los resultados de la Tensión equivalente de Von-Mises tienden a converger en el valor de 631.90 [KPa] al aumentar la densidad de la malla con 27902 elementos y 42254 nodos, con una variación de 0.27%.

Figura 25

Análisis de Convergencia del Mallado para el Actuador Blando



En la Tabla 6 se observan las Tensiones equivalentes de Von-Mises para los diferentes mallados.

Tabla 6

Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para el actuador blando

| Iteración | Elementos | Nodos | Tensión [KPa] |
|-----------|-----------|-------|---------------|
| 1 | 4322 | 7302 | 495.06 |
| 2 | 5643 | 9455 | 534.21 |
| 3 | 25133 | 38313 | 630.17 |
| 4 | 27902 | 42254 | 631.90 |

Diseño CAD del molde

Para obtener los actuadores blandos previamente indicados se utilizará la técnica conocida como moldeo de plástico. Para esto es necesario realizar el diseño de los moldes.

Tabla 7

Diseño CAD de los moldes

| Descripción | Figura |
|---|--|
| <p>Molde Superior. Está compuesto por 2 partes desmontables para facilitar el desmoldeo. El material será vertido en la parte superior.</p> |  |
| <p>Esta parte se encargará de almacenar el material.</p> |  |
| <p>Esta parte se encargará de dar la forma al material.</p> |  |

| Descripción | Figura |
|--|--|
| <p>Molde Inferior. Está compuesto por una sola pieza sobre la cual será vertido el material.</p> |  |

Construcción del molde definitivo

Para la fabricación del molde se ha optado por utilizar la técnica de impresión 3D debido a la facilidad que esta presenta y su versatilidad de llevar diseños 3D a la vida real. Estos moldes deben presentar ciertas características que permitan un desmoldeo sencillo y que puedan ser utilizados a futuro. Por lo tanto, se presentan 3 alternativas del material con el que se va a realizar la impresión, los cuales son PLA, Soft PLA y TPU.

Tabla 8

Selección de Conceptos: Material del molde

| Criterios de Selección | PLA | Soft PLA | TPU |
|---------------------------------|-----|----------|-----|
| Deformación Térmica | 0 | - | - |
| Seguridad Alimenticia | + | + | - |
| Facilidad de desmoldeo | 0 | + | + |
| Facilidad de Manufactura | 0 | 0 | 0 |
| Precio | + | 0 | - |

| Criterios de Selección | PLA | Soft PLA | TPU |
|------------------------|-----|----------|-----|
| Suma + | 2 | 2 | 1 |
| Suma 0 | 3 | 2 | 1 |
| Suma - | 0 | 1 | 3 |
| Evaluación Neta | 2 | 1 | -2 |
| Lugar 1 | 1 | 2 | 3 |
| ¿Continuar? | Si | No | No |

Tabla 9

Evaluación de Conceptos: Material del molde

| Criterios de Selección | Peso | PLA | | Soft PLA | | TPU | |
|--------------------------|------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
| | | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Deformación Térmica | 20% | 3 | 0.6 | 1 | 0.2 | 1 | 0.2 |
| Seguridad Alimenticia | 25% | 5 | 1.25 | 5 | 1.25 | 1 | 0.25 |
| Facilidad de desmoldeo | 25% | 3 | 0.75 | 4 | 1 | 5 | 1.25 |
| Facilidad de Manufactura | 20% | 4 | 0.8 | 3 | 0.6 | 3 | 0.6 |
| Precio | 10% | 5 | 0.5 | 3 | 0.3 | 1 | 0.1 |
| Total Puntos | | | 3.9 | | 3.35 | | 2.4 |
| Lugar | | | 1 | | 2 | | 3 |
| ¿Continuar? | | | Desarrollar | | No | | No |

De acuerdo a los resultados dados por la Tabla 8 y Tabla 9 se decidió que el material con el que se van a construir los moldes por medio de la impresión 3D es el PLA. Entre las características que resaltan para este material se encuentran que cuenta con seguridad alimenticia y tiene una deformación térmica menor al TPU y Soft PLA.

Los parámetros escogidos en cuanto a relación de peso y fuerza se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Parámetros de configuración de impresora 3D

| Parámetros | Valor |
|------------------------|---------|
| Material | PLA |
| Altura de capa | 0.25 mm |
| Grosor de la pared | 2 mm |
| Densidad de relleno | 40% |
| Velocidad de impresión | 75 mm/s |

Nota. Estos mismos valores van a ser utilizados para la impresión de la muñeca ya que son los óptimos para aplicaciones en eslabones robóticos.

Estos parámetros fueron recogidos de ensayos realizados a probetas impresas con estos parámetros que fueron sometidas a compresión la Tabla 11 muestra los resultados de estos ensayos recogidos del trabajo de titulación “Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D” de Jimmy Canseco y Cristian Conrado.

Tabla 11

Ensayos de Compresión Probetas impresas en 3D

| Espesor [mm] | % de Relleno | Fuerza Máxima [g] | Peso [g] | Peso/Fuerza ($\times 10^{-3}$) |
|--------------|--------------|-------------------|-------------|----------------------------------|
| 2 | 20 | 1084 | 5.53 | 5.10148 |
| 2 | 30 | 1174 | 6.02 | 5.12777 |
| 2 | 40 | 1360 | 6.48 | 4.76471 |
| 3 | 20 | 1272 | 6.77 | 5.32233 |

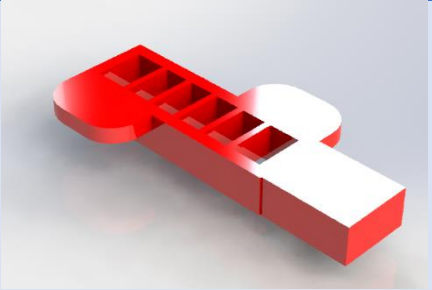
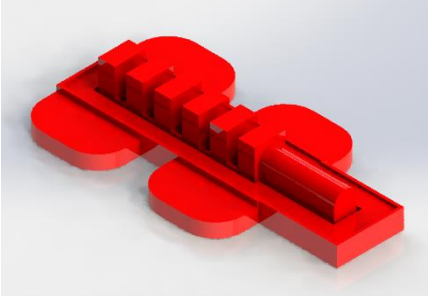
| Espesor [mm] | % de Relleno | Fuerza Máxima [g] | Peso [g] | Peso/Fuerza ($\times 10^{-3}$) |
|--------------|--------------|-------------------|----------|----------------------------------|
| 3 | 30 | 1436 | 7.09 | 4.93733 |
| 3 | 40 | 1472 | 7.28 | 4.94565 |
| 4 | 20 | 1456 | 7.58 | 5.20604 |
| 4 | 30 | 1564 | 7.78 | 4.97442 |
| 4 | 40 | 1650 | 8.01 | 4.85455 |

Nota. Los resultados indican que los valores más adecuados son los obtenidos a partir de la probeta con un espesor de 2 mm y 40% de relleno (Canseco & Conrado, 2020).

En la Tabla 12 se indican los tiempos de impresión de cada uno de los elementos.

Tabla 12

Tiempos de impresión de los moldes

| Pieza | Tiempo de Impresión | Material Depositado | Diseño CAD |
|-------------------|---------------------|---------------------|--|
| Molde Superior 1A | 5h 6min | 40 g |  |
| Molde Superior 2A | 3h 32 min | 27 g |  |

| Pieza | Tiempo de Impresión | Material Depositado | Diseño CAD |
|----------------|---------------------|---------------------|--|
| Molde Inferior | 1h 27 min | 11 g |  |

Construcción de los actuadores blandos definitivos

Una vez que se ha obtenido el molde se puede proceder a la construcción de los actuadores blandos. El material con el que deben fabricarse debe poseer características que aseguren una buena flexibilidad y un adecuado tiempo de curado. Es así que se presentan 2 alternativas las cuales son el Mold Star 30 y Elastosil M4601.

Tabla 13

Selección de Conceptos: Material del actuador blando

| Criterios de Selección | Mold Star 30 | Elastosil M4601 |
|------------------------|--------------|-----------------|
| Flexibilidad | 0 | + |
| Seguridad Alimenticia | + | + |
| Tiempo de Curado | + | 0 |
| Elongación | 0 | 0 |
| Precio | 0 | 0 |
| Suma + | 2 | 2 |
| Suma 0 | 2 | 2 |
| Suma - | 0 | 0 |
| Evaluación Neta | 2 | 2 |
| Lugar 1 | 1 | 1 |

| Criterios de Selección | Mold Star 30 | Elastosil M4601 |
|------------------------|--------------|-----------------|
| ¿Continuar? | Si | Si |

Tabla 14

Evaluación de Conceptos: Material del actuador blando

| Criterios de Selección | Peso | Mold Star 30 | | Elastosil M4601 | |
|------------------------|------|--------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| | | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Flexibilidad | 25% | 4 | 1 | 5 | 1.25 |
| Seguridad Alimenticia | 25% | 5 | 1.25 | 5 | 1.25 |
| Tiempo de Curado | 25% | 5 | 1.25 | 3 | 0.75 |
| Elongación | 15% | 5 | 0.75 | 4 | 0.6 |
| Precio | 10% | 3 | 0.3 | 3 | 0.3 |
| Total Puntos | | | 4.55 | | 4.15 |
| Lugar | | | 1 | | 2 |
| ¿Continuar? | | | Desarrollar | | No |

De acuerdo a los resultados dados por la Tabla 13 y Tabla 14 se decidió que el material con el que se van a elaborar los actuadores blandos va a ser el Mold Star 30.

El material fue depositado sobre los moldes previamente diseñados. A los actuadores blandos diseñados les tomó un tiempo de 4 horas para que puedan ser manipulados.

Selección de Materiales para Actuadores Blandos

Los elementos utilizados para la elaboración de los actuadores blandos se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15

Materiales utilizados en los actuadores blandos

| Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|--------------|---|---|
| Soft PLA | <ul style="list-style-type: none"> Resistencia a la flexión: ± 54.4 MPa Resistencia a la tracción: 57 MPa Elongación: 175% Densidad: 1.12 g/cm^3 Resistencia al impacto: 6 KJ/m^2 Temperatura de impresión: $215 \text{ }^\circ\text{C} - 230 \text{ }^\circ\text{C}$ |  |
| Mold Star 30 | <p>Tiempo de Curado: 6 horas a temperatura ambiente – 10 minutos a $60 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>Resistencia a la tracción: 420 psi</p> <p>Elongación: 339%</p> <p>Radio de Mezcla: 1A:1B</p> |  |

Presión de Rotura de los Actuadores Blandos

Para poder determinar la presión de rotura de los actuadores blandos se utilizará la ecuación de Barlow, asumiendo que se está trabajando con tubos circulares (TBL

Performance Plastics, s.f.). Se utilizará un F.S de 2 para compensar el hecho de que no se está trabajando con un cilindro.

Dicha fórmula se observa en la ecuación (1).

$$PR = \frac{Res_{Tracción} * [x^2 - y^2]}{4 * y^2 * \left(1 + \frac{x^2}{y^2}\right)} \quad (1)$$

Donde:

$$X = OD/2$$

OD: Diámetro Externo en pulgadas

$$Y = ID/2$$

ID: Diámetro interno en pulgadas

Trabajando con una resistencia a la tracción de 420 [psi], un OD de 0.55 [in] e ID de 0.39 [in] se obtiene la presión de rotura presentada en la ecuación (2).

$$PR = 13.90 [psi] = 95.83 [KPa] = 0.96 [bar] \quad (2)$$

Diseño e implementación del sistema neumático

Para que los actuadores blandos puedan realizar su acción es necesario la implementación de un sistema neumático. El diseño de este sistema neumático permitirá ajustar la presión con la que los actuadores van a realizar la acción de agarre sobre las diferentes frutas. Para este propósito se realizará un Control de Presión Proporcional mediante un Regulador (Válvula) Proporcional de Presión.

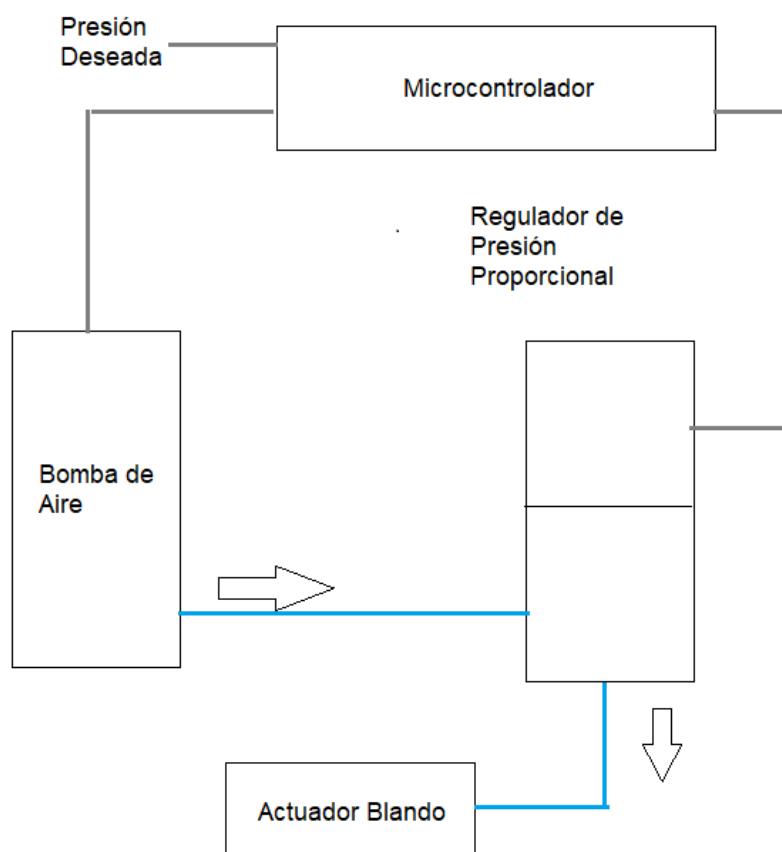
En la siguiente sección se hablará sobre el funcionamiento neumático del circuito. En la sección 3.3 se explicará el funcionamiento de los componentes eléctricos que realizarán las tareas de control.

Control Proporcional mediante un Regulador (Válvula) Proporcional de Presión

El circuito neumático trabajará con una Válvula Reguladora de Presión Proporcional de la familia SMC proporcionada por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. La válvula regulará la presión entregada a los actuadores en función de un amperaje regulado por un circuito de control junto a un microcontrolador, permitiendo una mayor o menor deformación del actuador blando.

Figura 26

Circuito Electro-Neumático del Control Proporcional de Presión



Selección de Componentes

Los componentes que más van a influir dentro del diseño del circuito neumático son la fuente de alimentación y la válvula que se va a utilizar.

En base a la información obtenida del análisis CAE y del cálculo de la presión de rotura es necesario considerar que la fuente de alimentación sea capaz de entregar un valor mínimo de 0.65 [bar] y tenga gran durabilidad. Es así que se presentan 2 alternativas las cuales son el compresor de aire y las micro bombas de aire.

Tabla 16

Selección de Conceptos: Fuente de Alimentación de Aire

| Criterios de Selección | Compresor de Aire | Micro bomba de aire |
|------------------------|-------------------|---------------------|
| Presión | + | + |
| Caudal | + | 0 |
| Durabilidad | + | - |
| Facilidad de uso | + | + |
| Suma + | 4 | 2 |
| Suma 0 | 0 | 1 |
| Suma - | 0 | 1 |
| Evaluación Neta | 4 | 1 |
| Lugar 1 | 1 | 2 |
| ¿Continuar? | Si | No |

Tabla 17

Evaluación de Conceptos: Fuente de Alimentación de Aire

| Criterios de Selección | Compresor de Aire | | | Micro bomba de aire | |
|------------------------|-------------------|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | Peso | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Presión | 40% | 5 | 2 | 3 | 1.2 |
| Caudal | 20% | 4 | 0.8 | 2 | 0.4 |
| Durabilidad | 30% | 5 | 1.5 | 1 | 0.3 |
| Facilidad de uso | 10% | 5 | 0.5 | 5 | 0.5 |
| Total Puntos | | | 4.8 | | 2.4 |
| Lugar | | | 1 | | 2 |
| ¿Continuar? | | | Desarrollar | | No |



De acuerdo a los resultados dados por las Tabla 16 y

Tabla 17 se decidió que se va a trabajar con el compresor de aire.

Los elementos utilizados dentro de los circuitos neumáticos se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18

Materiales utilizados en los circuitos neumáticos

| | Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|---|--|---|--|
| Control Proporcional mediante un Regulador (Válvula) Proporcional de Presión | Compresor de Aire | <ul style="list-style-type: none"> • Fuente de alimentación: 12 V DC • Corriente: 10 A • Presión Máxima: 140 psi • Flujo Máximo: 35 l/min |  |
| | Válvula Reguladora de Presión ITV2050-01F3BN2 | <ul style="list-style-type: none"> • Alimentación: 24V DC • Corriente: 0.12 A • Entrada: 4 – 20 mA DC • Salida: 0.005 – 0.9 MPa |  |

Diseño y Construcción de la Muñeca

Los actuadores blandos necesitaban de un bastidor que les permita posicionarse y, luego de identificar las frutas, adaptarse a las condiciones que le faciliten realizar un agarre óptimo. Para cumplir con este objetivo el bastidor se diseñó semejante a una muñeca donde se acoplaron los dedos, es decir los actuadores blandos. Las especificaciones de funcionalidad requeridas fueron la variabilidad del diámetro de agarre de los actuadores, lo cual brindaría la capacidad de adaptarse a diferentes formas y diámetros de frutas y rotación continua, esta le permitiría posicionar los actuadores y ubicar el sistema de visión artificial para llevar a cabo la identificación de la fruta. Además de soportar los actuadores blandos y posicionarlos, también debía

albergar el sistema de visión artificial y partes del circuito neumático que provee la energía motriz de los actuadores blandos.

Criterios de Funcionalidad

La variabilidad del diámetro como criterio de funcionalidad y especificación se atacó mediante tres posibles mecanismos que fueron cuidadosamente seleccionados, cada uno por que aportaba un factor importante o cumplía con especificaciones de forma o de peso. Estos mecanismos seleccionados fueron BIELA MANIVELA ADAPTADO (BMA), DIFERENCIALES PERPENDICULARES CON ENGRANES HELICOIDALES (DPEH), BARRA RIGIDA CON CORREDERAS PERPENDICULARES (BRCP). A continuación, se presenta el análisis comparativo de selección que permitió facilitar la decisión de aplicación de uno de estos conceptos en la muñeca.

Tabla 19

Selección de Conceptos: Mecanismo de Variabilidad de diámetro.

| Criterios de Selección | BMA | DPEH | BRCP |
|------------------------|-----|------|------|
| Precisión | 0 | + | + |
| Confiabilidad | + | + | + |
| Reducción Peso | + | 0 | + |
| Reducción de Espacio | 0 | + | 0 |
| Simplicidad Aplicación | - | - | + |
| Costo | 0 | - | + |
| Suma + | 2 | 3 | 5 |
| Suma 0 | 3 | 1 | 1 |
| Suma - | 1 | 2 | 0 |
| Evaluación Neta | 1 | 1 | 5 |
| Lugar 1 | 3 | 2 | 1 |

| Criterios de Selección | BMA | DPEH | BRCP |
|------------------------|-----|------|------|
| ¿Continuar? | No | No | Si |

Tabla 20

Evaluación de Conceptos: Mecanismo de variabilidad de diámetro.

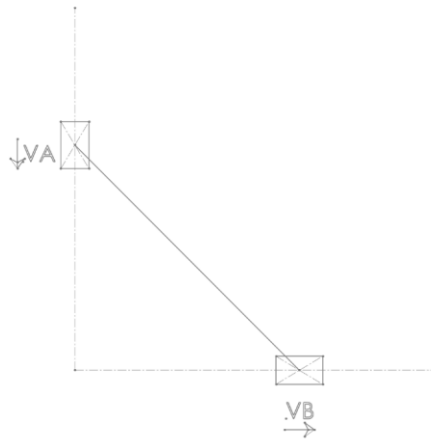
| Criterios de Selección | Peso | BMA | | DPEH | | BRCP | |
|---------------------------|------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
| | | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Precisión | 25% | 3 | 0.75 | 5 | 1.25 | 5 | 1.25 |
| Confiabilidad | 10% | 4 | 0.4 | 5 | 0.5 | 4 | 0.4 |
| Reducción de Peso | 25% | 4 | 1.0 | 3 | 0.75 | 4 | 1.0 |
| Reducción de Espacio | 25% | 1 | 0.25 | 4 | 1.0 | 3 | 0.75 |
| Simplicidad de Aplicación | 10% | 2 | 0.2 | 1 | 0.1 | 5 | 0.5 |
| Costo | 5% | 3 | 0.15 | 1 | 0.05 | 4 | 0.2 |
| Total Puntos | | | 2.75 | | 3.65 | | 4.1 |
| Lugar | | | 3 | | 2 | | 1 |
| ¿Continuar? | | | No | | No | | Desarrollar |

El mecanismo seleccionado con base en los criterios indicados fue el que corresponde a una barra rígida anclada a correderas perpendiculares entre sí que permite adaptar el movimiento rotatorio de un servomotor a movimiento lineal mediante un tornillo sin fin y luego este movimiento lineal vertical adaptarlo a un movimiento horizontal y diametral que a su vez amplía el diámetro de agarre del actuador. Se realizó

el análisis de la mecánica del movimiento para encontrar la relación entre la entrada de rotación continua y el desplazamiento diametral de cada acople para actuador blando.

Figura 27

Mecanismo propuesto para la muñeca



A continuación, se presentan las 3 ecuaciones que definen al mecanismo.

$$v_a = v_b \quad (3)$$

$$\frac{\Delta x_a}{\Delta t} = \frac{\Delta x_b}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\Delta x_a = \Delta x_b \quad (5)$$

Variación de posición angular a variación de posición lineal en A. Según la especificación del tornillo sin fin de 4 hilos se tiene un paso de 2mm, el avance se define por el paso multiplicado por el número de hilo. Con el avance se obtiene una relación entre variación de posición lineal contra variación de posición angular.

$$\text{Avance: } \frac{8 \text{ mm}}{\text{rev}} \quad (6)$$

$$\text{Precisión: } k = \frac{8mm}{360^\circ} = \frac{0.02mm}{deg} \quad (7)$$

Relación de variación de posición B contra variación de posición angular del servomotor. En cuanto a la rotación completa para asumir esta especificación de funcionalidad se acopló un segundo servomotor que permite posicionar el bastidor completo con referencia al eje de simetría, permitiendo una variación angular, una rotación como tal.

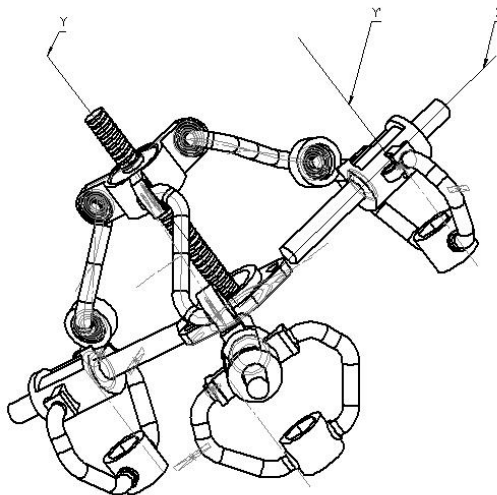
Modelo Matemático de los Elementos Rígidos

- Tornillo de Fuerza

Se debió analizar el mecanismo para determinar las fuerzas involucradas en el proceso y poder aplicar un análisis de elementos finitos para determinar los esfuerzos máximos, deformación unitaria y factores de seguridad del mismo.

Figura 28

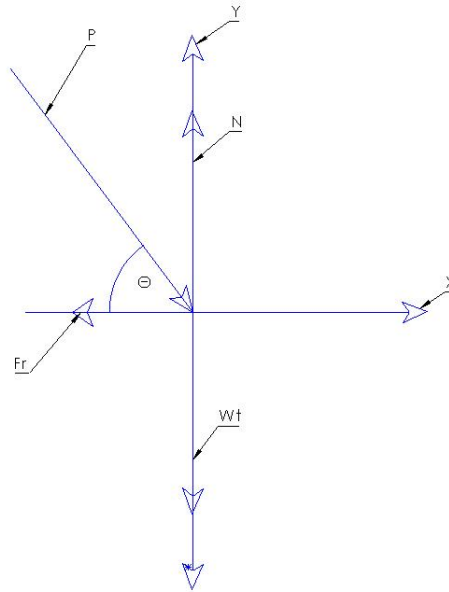
Mecanismo a considerar



A continuación, se presentan los diagramas de cuerpo libre considerando los eslabones como barras rígidas y analizando cada uno de los brazos por separado. Se considera el movimiento de descenso de la tuerca y el movimiento de izquierda a derecha de los acoples para dedos.

Figura 29

DCL 01: Acople de dedos para determinar la reacción en el eslabón



Nota. Análisis estático para determinar P (fuerza que trasmite la barra rígida), se analizará justo el momento en que se empieza a mover puesto que una vez vencida la inercia por efecto de los rodamientos lineales la fricción es casi nula. Se ha identificado Fr (fuerza de rozamiento estático), Wt (peso total de los acoples y el actuador blando), N (normal). Teta (θ) es el ángulo que forma a barra rígida con el plano x y varía dependiendo de la posición, se maximizará la función obtenida para encontrar el valor máximo de fuerza P.

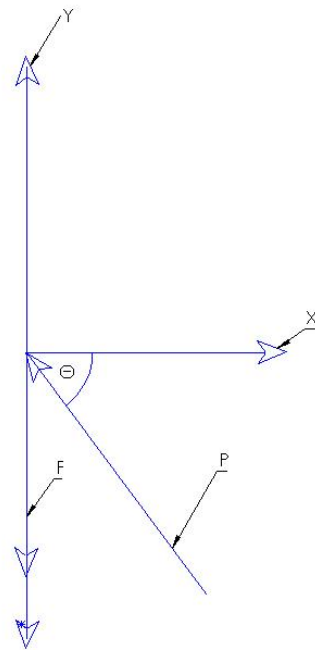
Realizando una sumatoria de fuerzas en X y Y, y despejando P, se define a dicha fuerza en la ecuación (6).

$$P = \frac{u * Wt}{\cos(\theta) - u * \sin(\theta)} \quad (8)$$

La fuerza P es transmitida por la barra rígida desde el tornillo de fuerza, que convierte el par del motor en fuerza y desplazamiento lineal, para lo cual se analizará en primer lugar la fuerza necesaria F para romper la fricción estática y luego el par necesario para producir dicha fuerza a partir de las características del tornillo elegido.

Figura 30

DCL 02: Acople de tuerca para calcular la fuerza necesaria para impulsar el mecanismo.



Realizando una sumatoria de fuerzas en Y, se define a F como se muestra en la ecuación (7).

$$F = \frac{u * Wt * \sin(\theta)}{\cos(\theta) - u * \sin(\theta)} \quad (9)$$

Para la reacción en x (Px) causa flexión en el tornillo de fuerza en el análisis de esfuerzos, ahora se procederá a calcular el par necesario para producir el desplazamiento en Y además de la fuerza necesaria para mover el mecanismo.

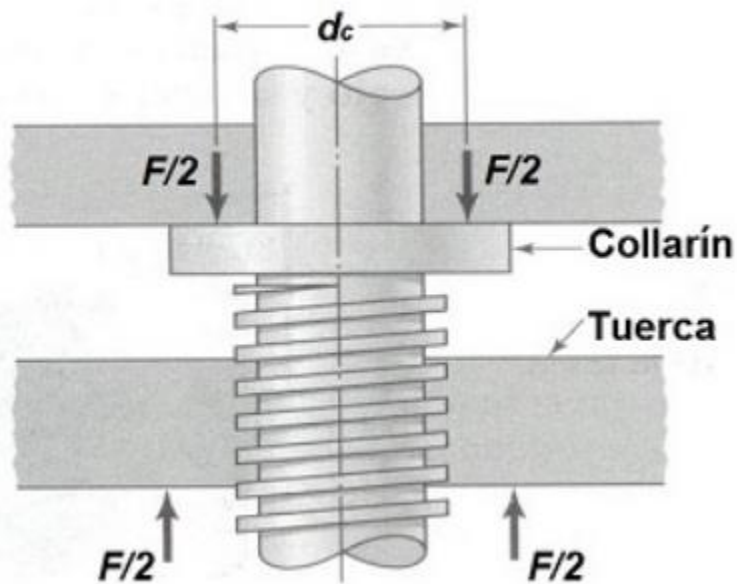
Para un valor de ángulo máximo por restricción geométrica del mecanismo de 85° se tiene una fuerza máxima por brazo de mecanismo.

$$F_{max} = 2.563 [N] \quad (10)$$

A continuación, se realizará un análisis de movimiento y fuerzas en el tornillo de potencia.

Figura 31

Representación de un tornillo de potencia con collarín

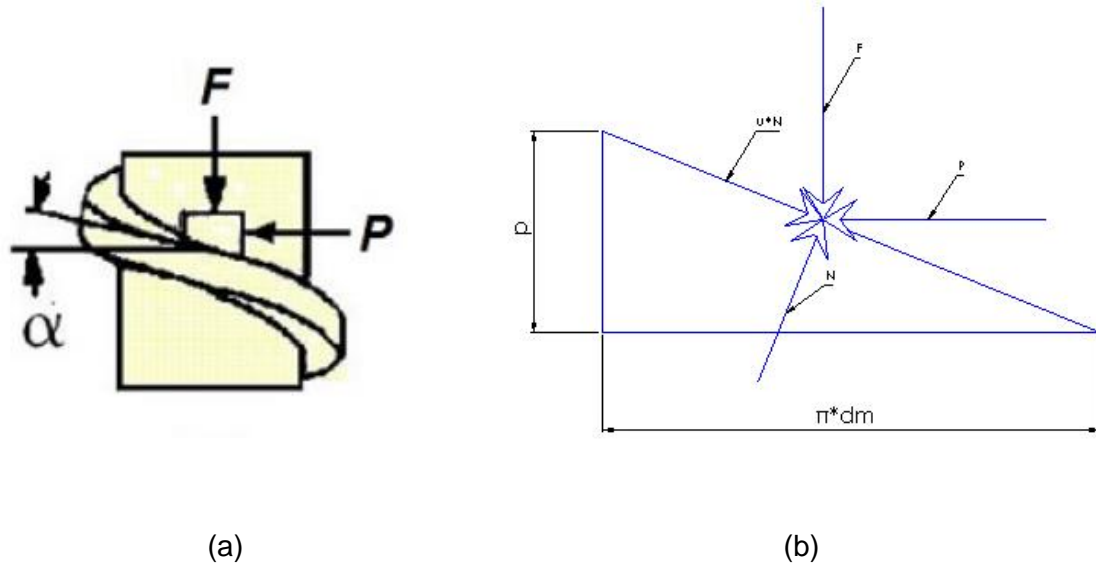


Nota. Donde F es el conjunto de fuerzas axiales que el mecanismo necesita mover, α es el ángulo de la hélice, p es el paso o avance del tornillo, d_m diámetro medio del tornillo o diámetro primitivo (Ingemecánica, s.f.).

Analizando las fuerzas necesarias para romper la fricción entre tornillo y collarín encontramos el siguiente DCL.

Figura 32

Representación de un tornillo de potencia con collarín



Nota. (a) Representación de tornillo de potencia. (b) DCL del tornillo de potencia (Ingemecánica, s.f.).

En este caso, las fuerzas que interactúan en la rosca serán las siguientes:

F : representa la carga a elevar, y es la suma de todas las fuerzas axiales que actúan sobre el tornillo. En este caso 3 veces la fuerza máxima.

P : fuerza necesaria que es necesario realizar para vencer la fuerza de rozamiento y hacer ascender la carga por el plano inclinado de la rosca del tornillo.

N : fuerza normal al plano de la hélice del tornillo.

$\mu \cdot N$: representa a la fuerza de rozamiento que es necesario vencer para hacer girar al tornillo.

Al desarrollar las ecuaciones para el eje “y” donde se da el movimiento y tomando en cuenta los rozamientos en el collarín se tiene la siguiente expresión que

relaciona las cargas para el torque máximo necesario. Se debe tomar en cuenta que al tener que mover 3 acoples al mismo tiempo la fuerza F calculada se triplica para el cálculo.

Realizando una sumatoria de fuerzas se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$N = \frac{F}{\cos(\alpha) - u * \sin(\alpha)} \quad (11)$$

$$P = \frac{F * (\sin(\alpha) + u * \cos(\alpha))}{\cos(\alpha) - u * \sin(\alpha)} \quad (12)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{P}{\pi * dm} \quad (13)$$

Para obtener el torque se relaciona la fuerza P con el diámetro medio dm.

$$T = P * \frac{dm}{2} \quad (14)$$

Reemplazado P y utilizando identidades trigonométricas basadas en $\tan(\alpha)$ se obtiene la siguiente ecuación.

$$T = F * \frac{dm}{2} * \left(\frac{\pi * u * dm - p}{\pi * dm + u * p} \right) \quad (15)$$

Donde

dm: es el diámetro medio del tornillo

u es el coeficiente de rozamiento estático entre tornillo y tuerca

p es el avance

Se tomará en cuenta los parámetros del tornillo de potencia escogido. Se pueden observar en la Tabla 21.

Tabla 21

Especificaciones del Tornillo de Potencia THSL-500-8D.

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|----------------|---------|-------|
| Diámetro medio | dm | 8 mm |
| Avance | p | 8 mm |
| Paso | Ps | 2 mm |
| # de hilos | n | 4 |

El torque calculado que permitirá generar el movimiento del mecanismo se encuentra en la ecuación (14).

$$T_c = 14 \text{ [Nmm]} \quad (16)$$

El desarrollo de los cálculos se puede observar en el Anexo 2. Se utilizó un software matemático para la resolución de las ecuaciones.

Considerando este valor de torque se podrá escoger el motor que permita generar el movimiento, tomando en consideración las necesidades de la muñeca. Para ello se utilizará un motor a pasos NEMA 17. Dicho motor podrá regular el diámetro de apertura de la muñeca y posee un torque de 450 [Nmm]. Las características técnicas del motor se presentan en la sección 3.3 del presente trabajo.

Análisis CAE de los elementos de la muñeca

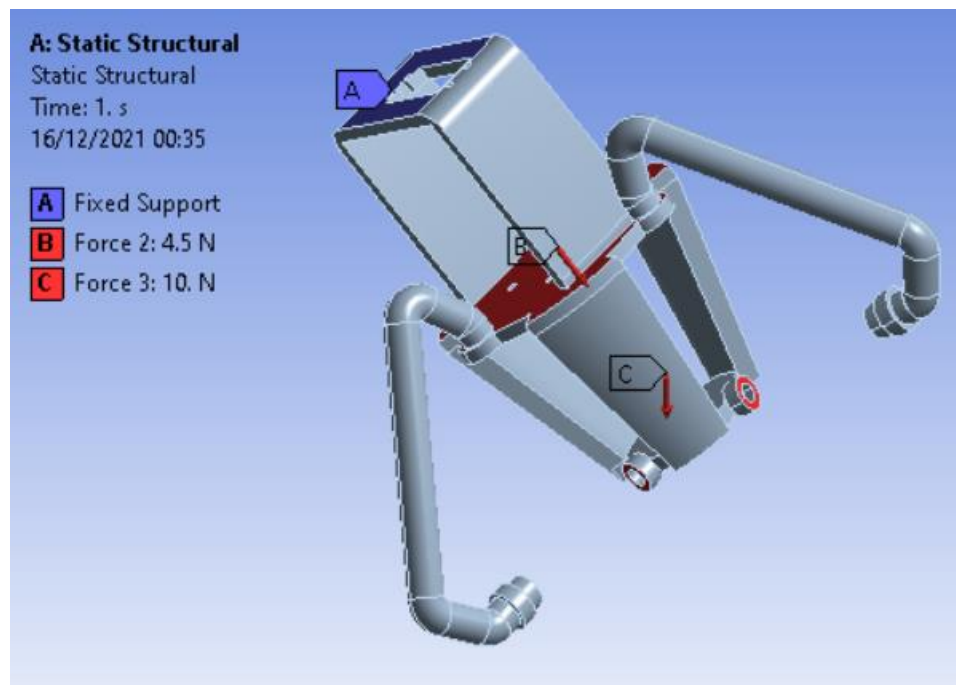
El análisis permitirá determinar cómo se va a comportar la muñeca a los torques y fuerzas establecidas. Se realizará la simulación de los elementos que van a ser impresos en 3D, usando como material al PLA.

Las diferentes fuerzas a ser aplicadas son las calculadas para obtener el modelo matemático del sistema.

En la Figura 33 se observa las cargas aplicadas junto al soporte fijo. El soporte fijo se va a ubicar en la zona donde la muñeca vaya a acoplarse. La fuerza de 2.3 [N] corresponde al peso del motor NEMA 17 y la fuerza de 10 [N] corresponde al valor de las fuerzas de las reacciones sobre los puntos en donde va a estar apoyado el eje.

Figura 33

Cargas aplicadas en la muñeca



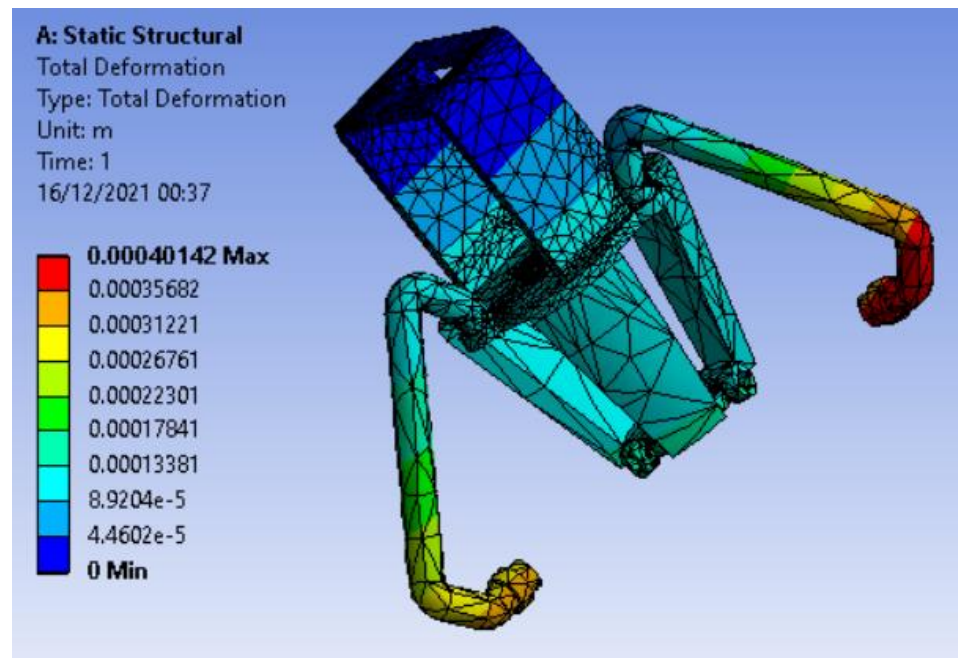
Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación.

- Estado de Deformación

En la Figura 34 se puede observar que la muñeca alcanza una deformación máxima de 0.401 [mm] en los soportes de los actuadores blandos.

Figura 34

Estado de Deformación de la muñeca

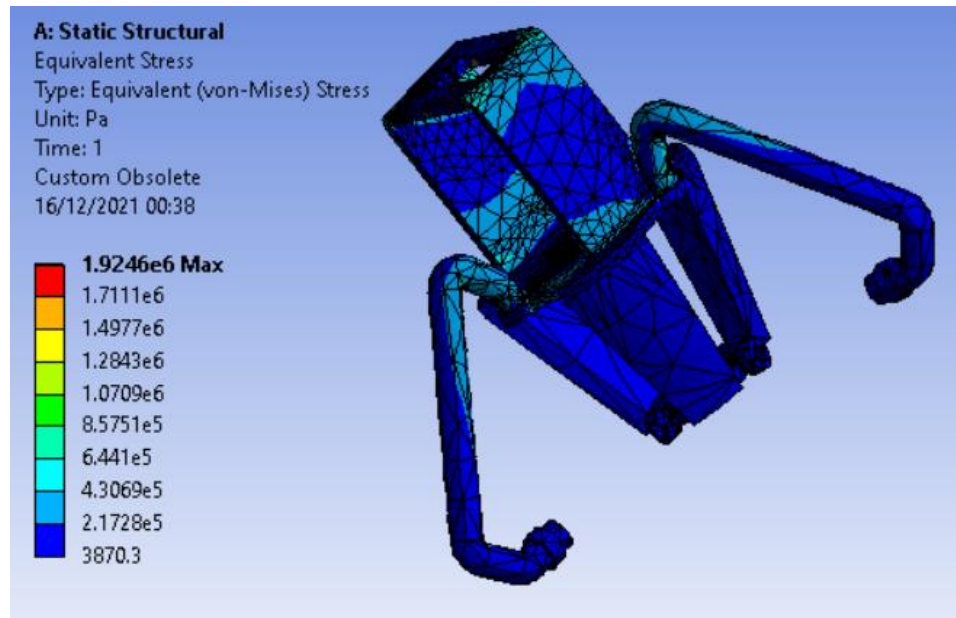


- Tensión de Von-Mises

Como se puede observar en la Figura 35 la muñeca alcanzo una Tensión Máxima de Von-Mises de 1.924 [MPa].

Figura 35

Tensión equivalente de Von-Mises de la muñeca

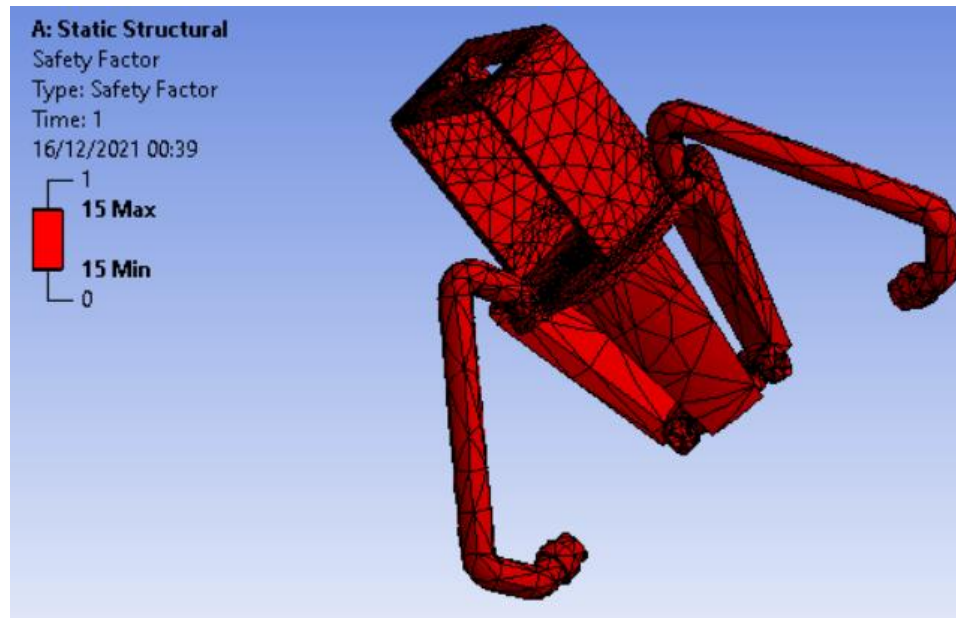


- Factor de Seguridad

Como se puede observar en la Figura 36 el actuador blando obtuvo un F.S. máximo y mínimo de 15.

Figura 36

Factor de Seguridad de la muñeca

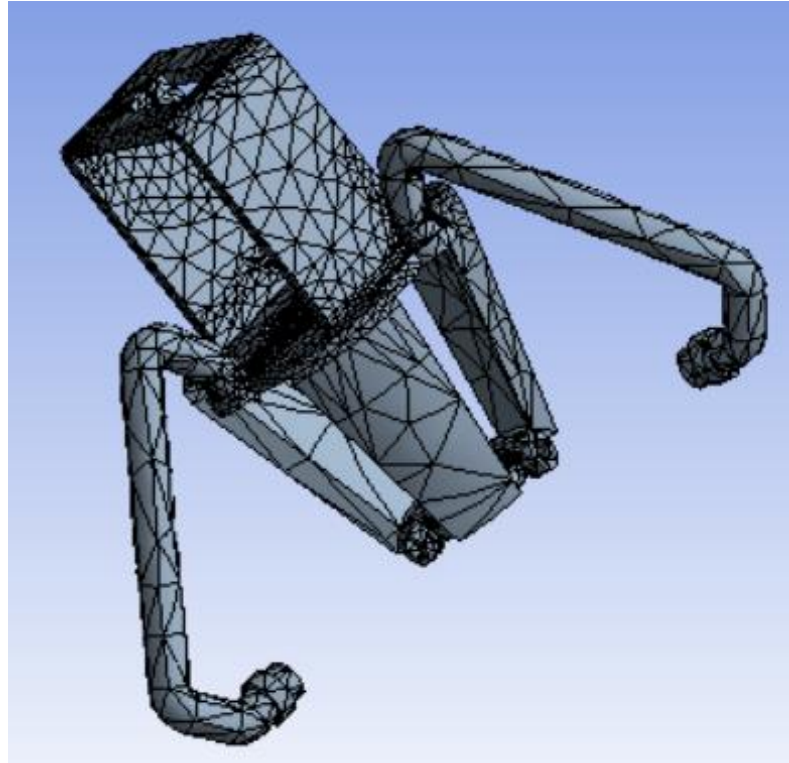


- Análisis de Malla y Convergencia

El mallado de la muñeca fue realizado considerando 38505 elementos y 77602 nodos. El mallado puede observarse en la Figura 37.

Figura 37

Mallado de la muñeca



En la Figura 38 se puede observar que los resultados de la Tensión equivalente de Von-Mises tienden a converger en el valor de 1.92 [MPa] al aumentar la densidad de la malla con 17938 elementos y 30798 nodos, con una variación de 1.09%.

Figura 38

Análisis de Convergencia del Mallado para la muñeca



En la Tabla 22 se observan las Tensiones equivalentes de Von-Mises para los diferentes mallados.

Tabla 22

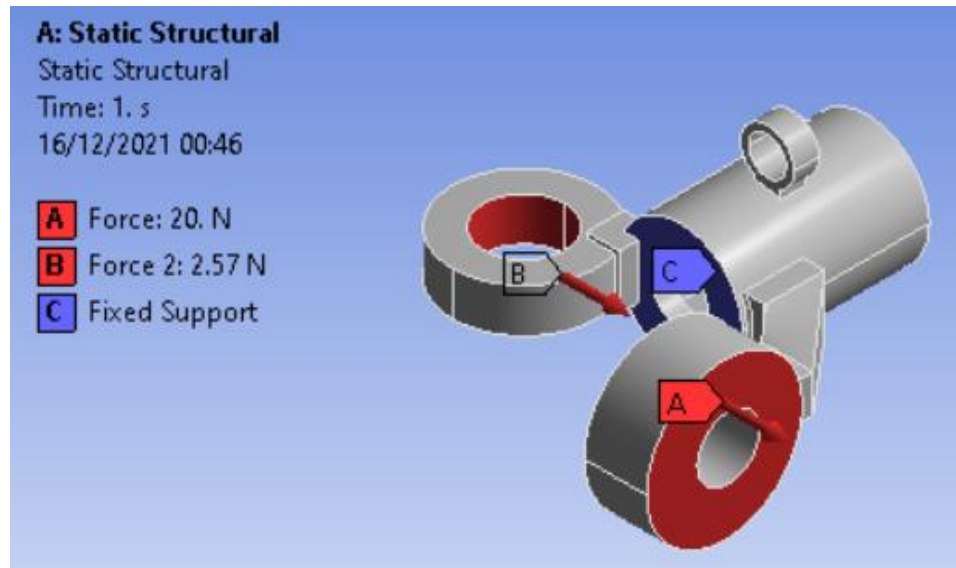
Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para la muñeca

| Iteración | Elementos | Nodos | Tensión [MPa] |
|-----------|-----------|-------|---------------|
| 1 | 7145 | 13407 | 1.57 |
| 2 | 8232 | 15311 | 1.95 |
| 3 | 17938 | 30798 | 1.92 |

En la Figura 39 se observa las cargas aplicadas a los soportes de los actuadores blandos. La fuerza de 20 [N] corresponde al peso de los actuadores blandos y considera el peso máximo de objetos que va a cargar. La fuerza de 2.57 [N] corresponde a la fuerza transmitida por la biela para que este elemento pueda deslizarse sobre el eje.

Figura 39

Cargas Aplicadas al Soporte



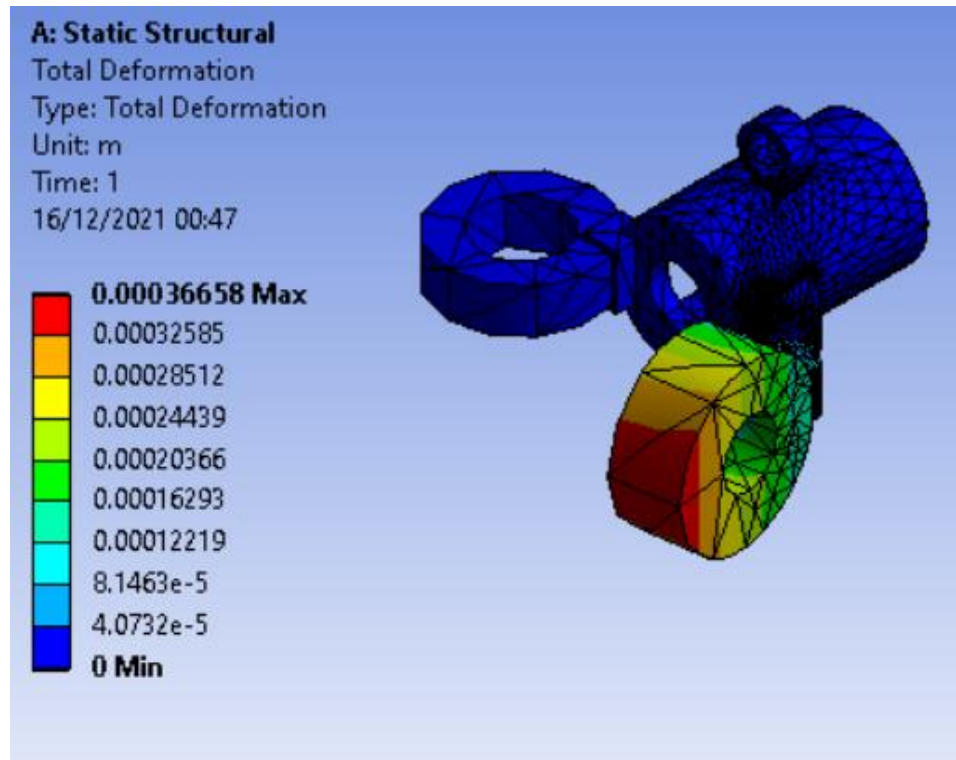
Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación.

- Estado de Deformación

En la Figura 40 se puede observar que el soporte alcanza una deformación máxima de 0.367 [mm].

Figura 40

Estado de Deformación del Soporte

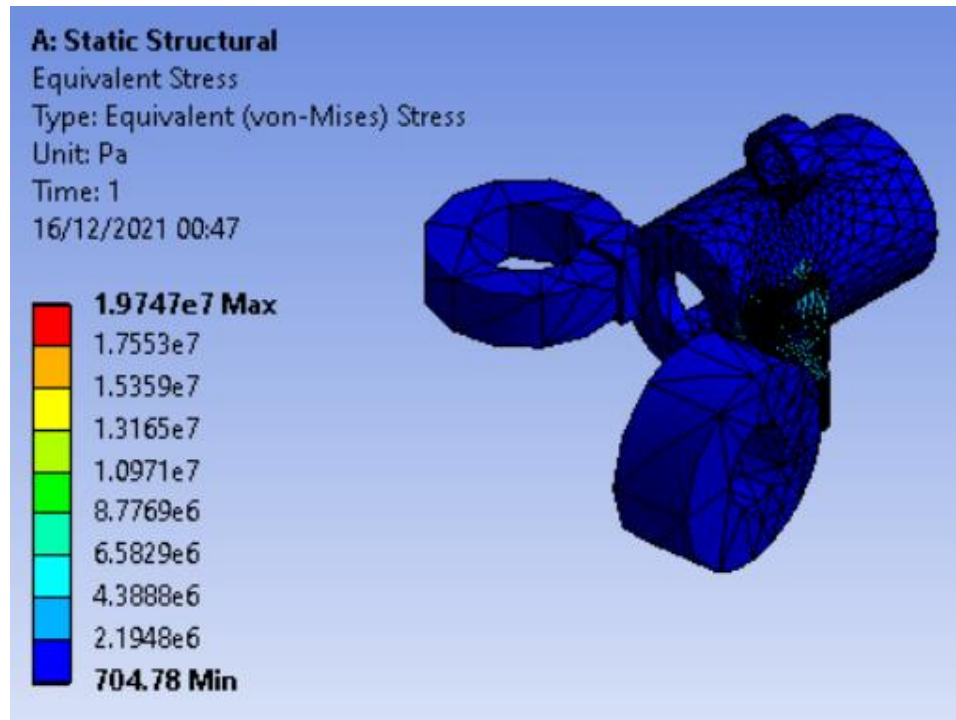


- Tensión de Von-Mises

Como se puede observar en la Figura 41 el soporte alcanzo una Tensión Máxima de Von-Mises de 19.75 [MPa].

Figura 41

Tensión equivalente de Von-Mises del Soporte

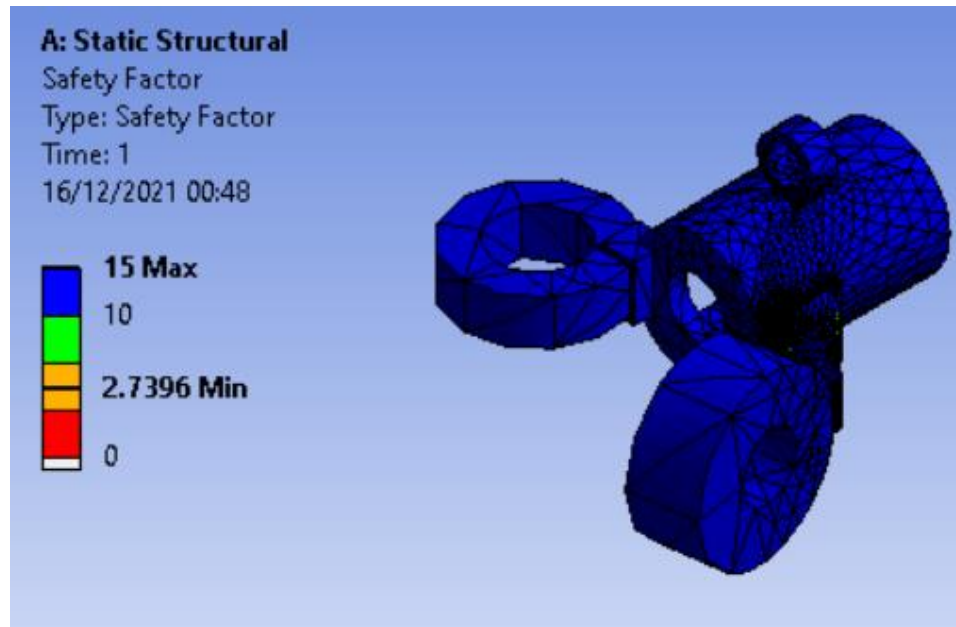


- Factor de Seguridad

Como se puede observar en la Figura 42 el soporte obtuvo un F.S. máximo de 15 y mínimo de 2.74.

Figura 42

Factor de Seguridad del Soporte

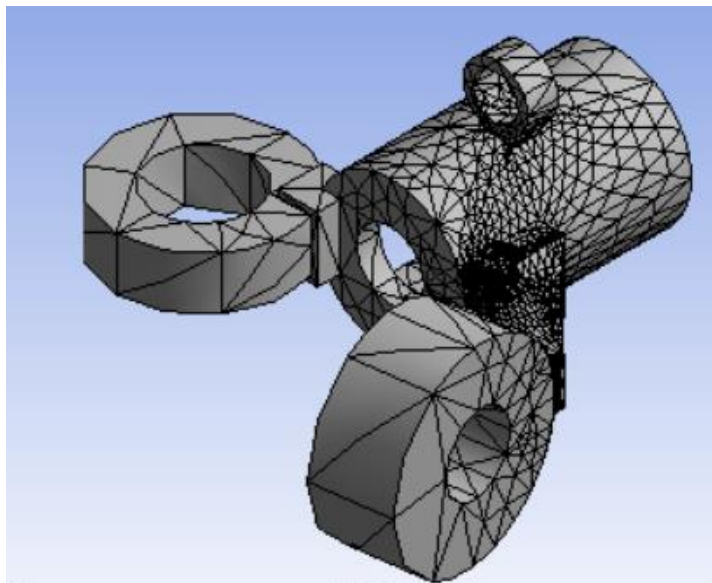


- Análisis de Malla y Convergencia

El mallado del soporte fue realizado considerando 47155 elementos y 69820 nodos. El mallado puede observarse en la Figura 43.

Figura 43

Mallado del soporte



En la Figura 44 se puede observar que los resultados de la Tensión equivalente de Von-Mises tienden a converger en el valor de 19.75 [MPa] al aumentar la densidad de la malla con 47155 elementos y 69820 nodos, con una variación de 1.86%.

Figura 44

Análisis de Convergencia del Mallado para el soporte



En la Tabla 23 se observan las Tensiones equivalentes de Von-Mises para los diferentes mallados.

Tabla 23

Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para el soporte

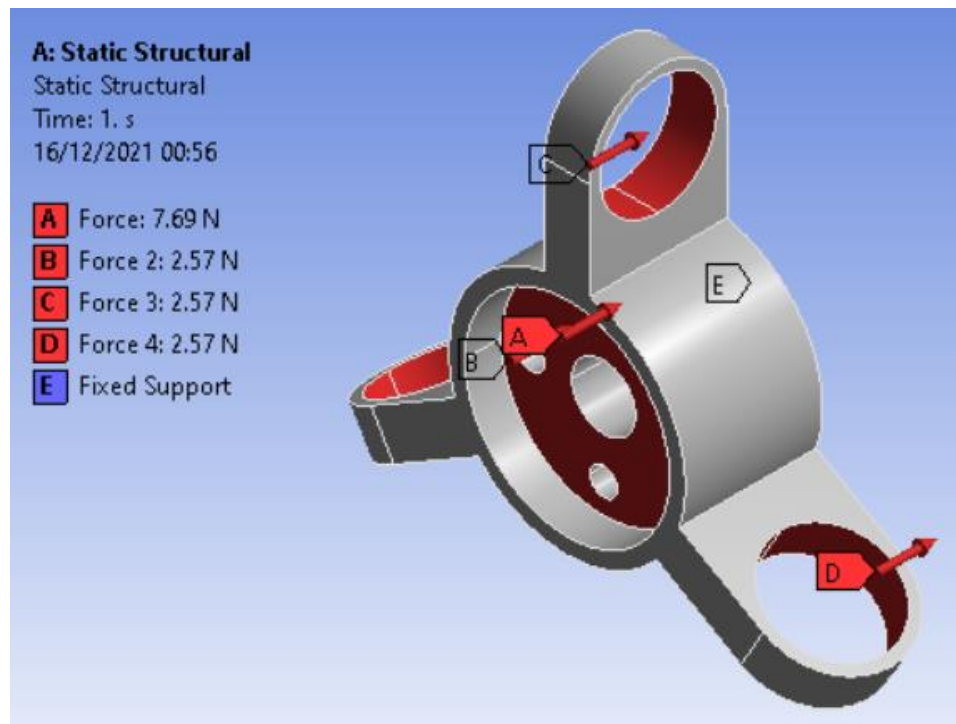
| Iteración | Elementos | Nodos | Tensión [MPa] |
|-----------|-----------|-------|---------------|
| 1 | 1088 | 2150 | 11.73 |
| 2 | 5900 | 10166 | 17.52 |
| 3 | 15530 | 24243 | 19.38 |
| 4 | 47155 | 69820 | 19.75 |

En la Figura 45 se observa las cargas aplicadas sobre el acople Tuerca-Biela. La fuerza de 7.69 [N] corresponde a la fuerza de aplastamiento que va a ejercer la tuerca

sobre esta pieza. La fuerza de 2.57 [N] corresponde a la fuerza que van a transmitir las bielas.

Figura 45

Cargas Aplicadas al Acople



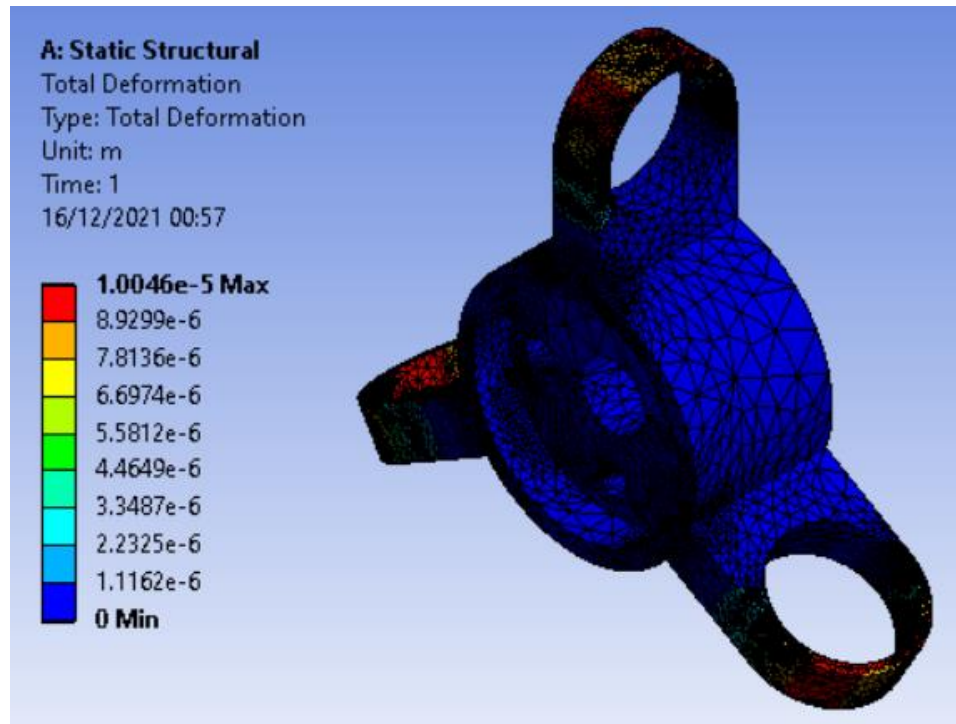
Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación.

- Estado de Deformación

En la Figura 46 se puede observar que el acople alcanza una deformación máxima de 0.01 [mm].

Figura 46

Estado de Deformación del Acople

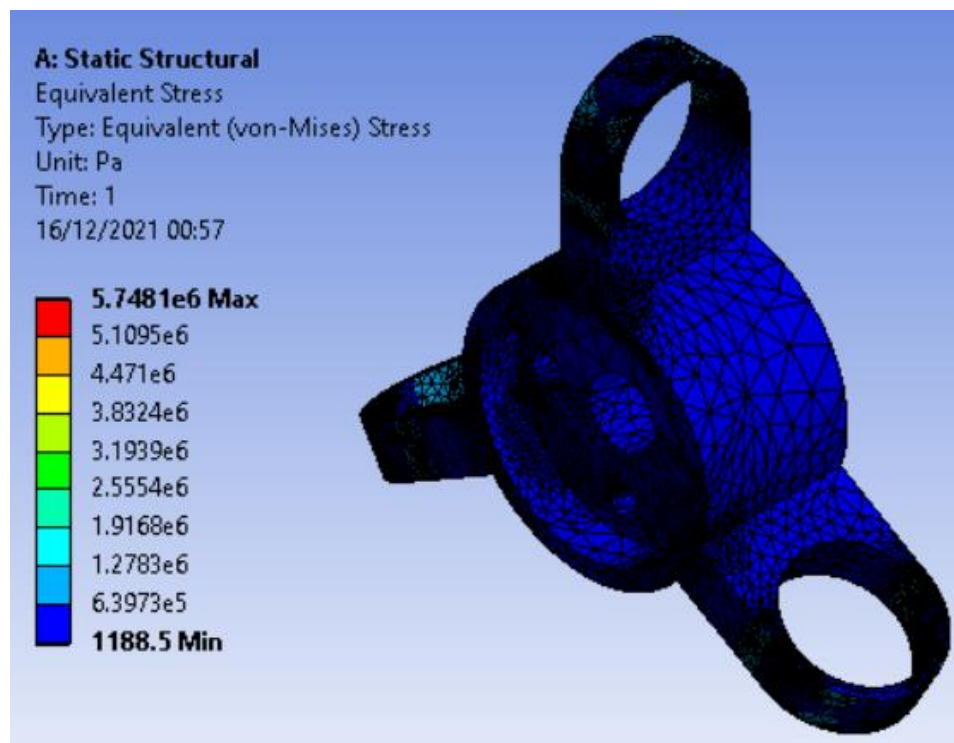


- Tensión de Von-Mises

Como se puede observar en la Figura 47 el acople alcanzo una Tensión Máxima de Von-Mises de 5.75 [MPa].

Figura 47

Tensión equivalente de Von-Mises del Acople

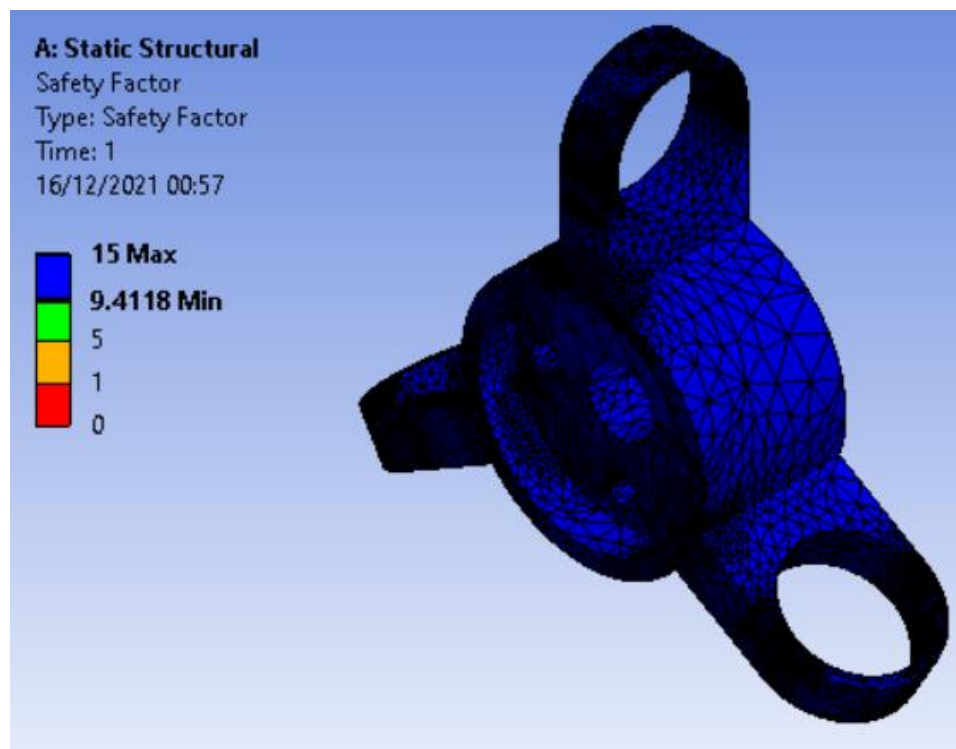


- Factor de Seguridad

Como se puede observar en la Figura 48 el acople obtuvo un F.S. máximo de 15 y mínimo de 9.41.

Figura 48

Factor de Seguridad del Acople

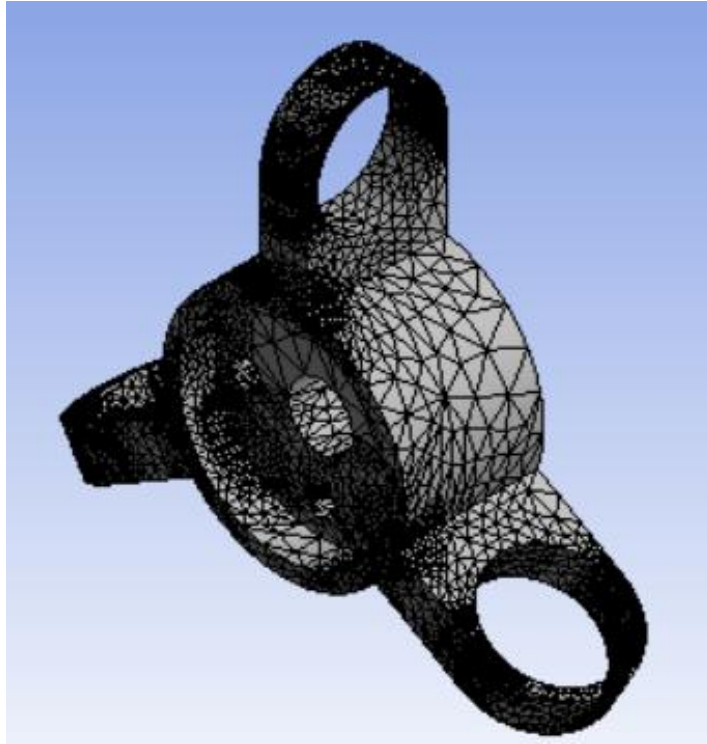


- Análisis de Malla y Convergencia

El mallado del acople fue realizado considerando 168830 elementos y 247757 nodos. El mallado puede observarse en la Figura 49.

Figura 49

Mallado del acople



En la Figura 50 se puede observar que los resultados de la Tensión equivalente de Von-Mises tienden a converger en el valor de 5.75 [MPa] al aumentar la densidad de la malla con 168830 elementos y 247757 nodos, con una variación de 0.74%.

Figura 50

Análisis de Convergencia del Mallado para el acople



En la Tabla 24 se observan las Tensiones equivalentes de Von-Mises para los diferentes mallados.

Tabla 24

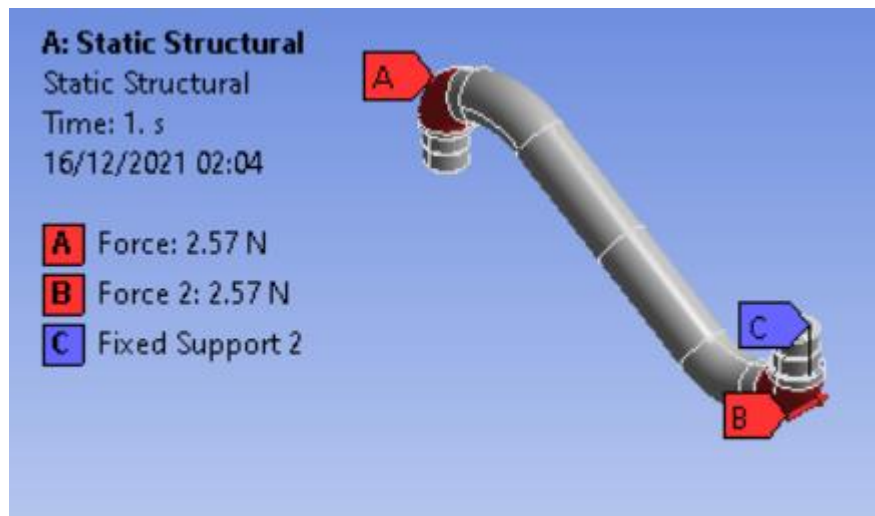
Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para el acople

| Iteración | Elementos | Nodos | Tensión [MPa] |
|-----------|-----------|--------|---------------|
| 1 | 38970 | 61408 | 3.15 |
| 2 | 87352 | 131661 | 3.34 |
| 3 | 158424 | 233161 | 5.71 |
| 4 | 168830 | 247757 | 5.75 |

En la Figura 51 se observa las cargas aplicadas sobre la biela. Las fuerzas de 2.57 [N] corresponden a las fuerzas que van a transmitir hacia los soportes para que estos puedan deslizarse sobre el eje.

Figura 51

Cargas Aplicadas a la biela



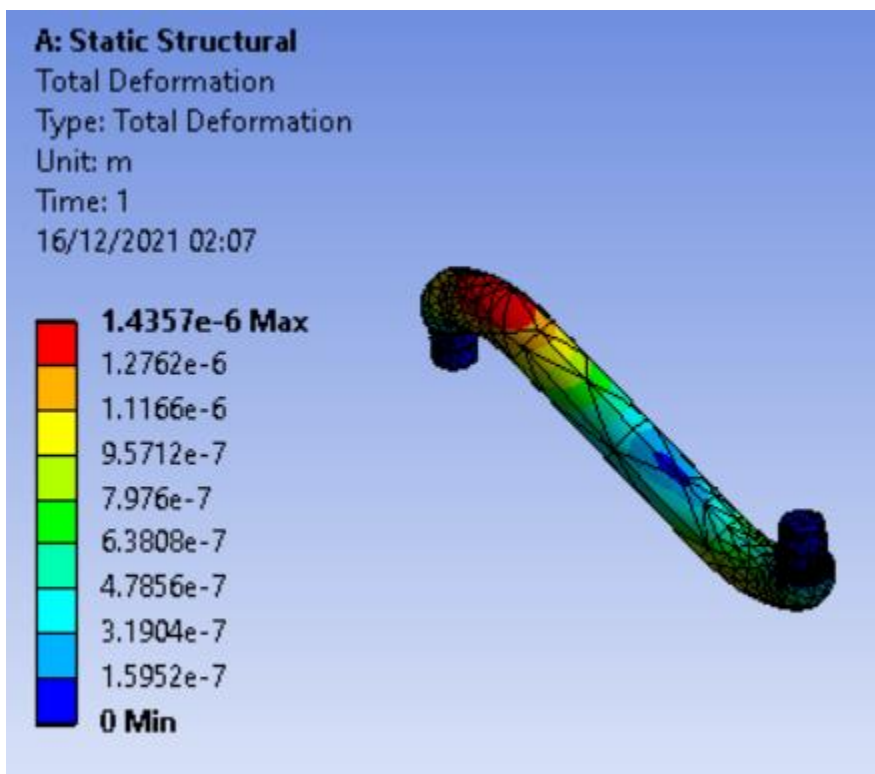
Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación.

- Estado de Deformación

En la Figura 52 se puede observar que la biela alcanza una deformación máxima de 0.001 [mm].

Figura 52

Estado de Deformación de la biela

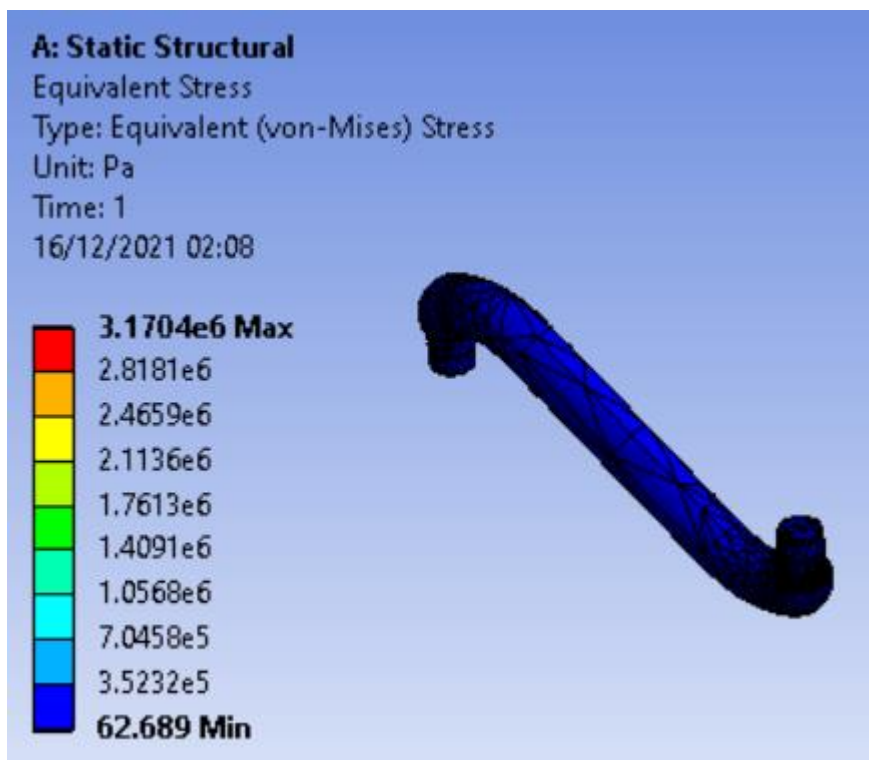


- Tensión de Von-Mises

Como se puede observar en la Figura 53 la biela alcanzó una Tensión Máxima de Von-Mises de 3.17 [MPa].

Figura 53

Tensión equivalente de Von-Mises de la biela

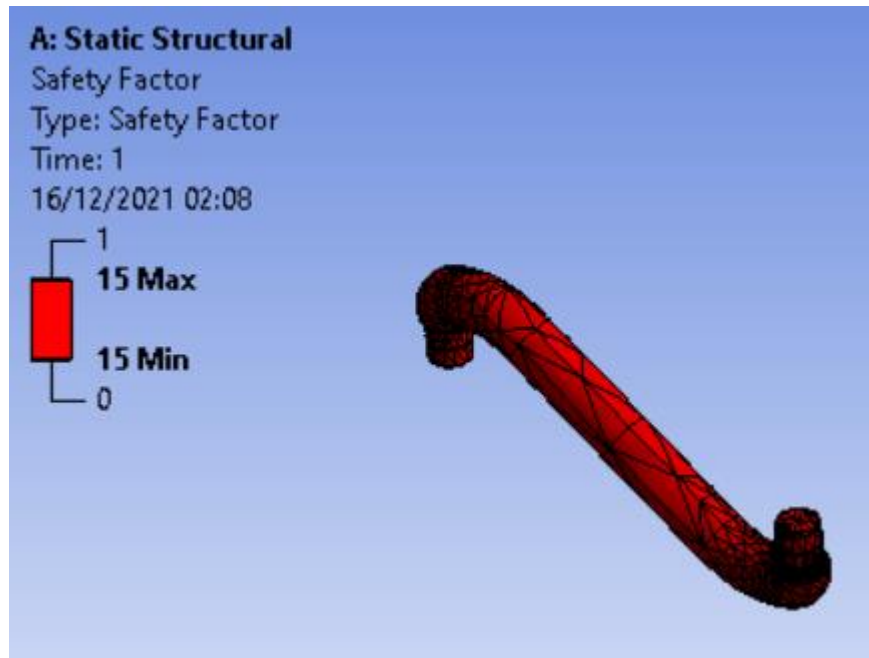


- Factor de Seguridad

Como se puede observar en la Figura 54 el actuador blando obtuvo un F.S. máximo y mínimo de 15.

Figura 54

Factor de Seguridad de la biela

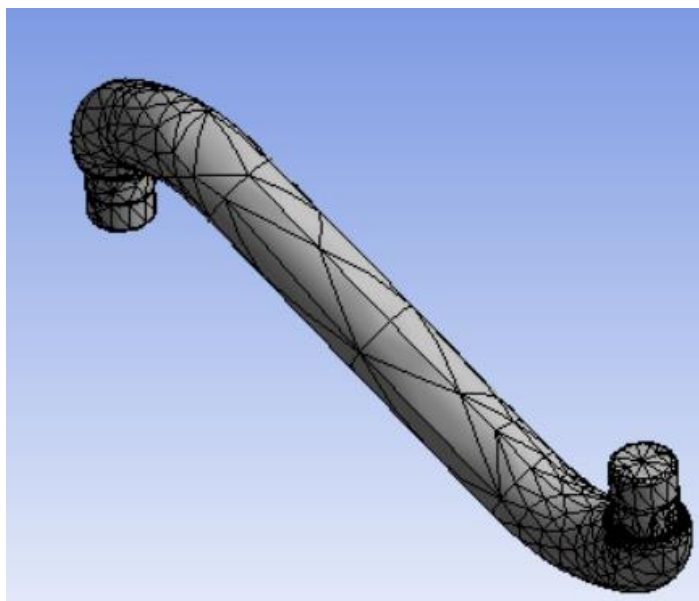


- Análisis de Malla y Convergencia

El mallado de la biela fue realizado considerando 16934 elementos y 26233 nodos. El mallado puede observarse en la Figura 55.

Figura 55

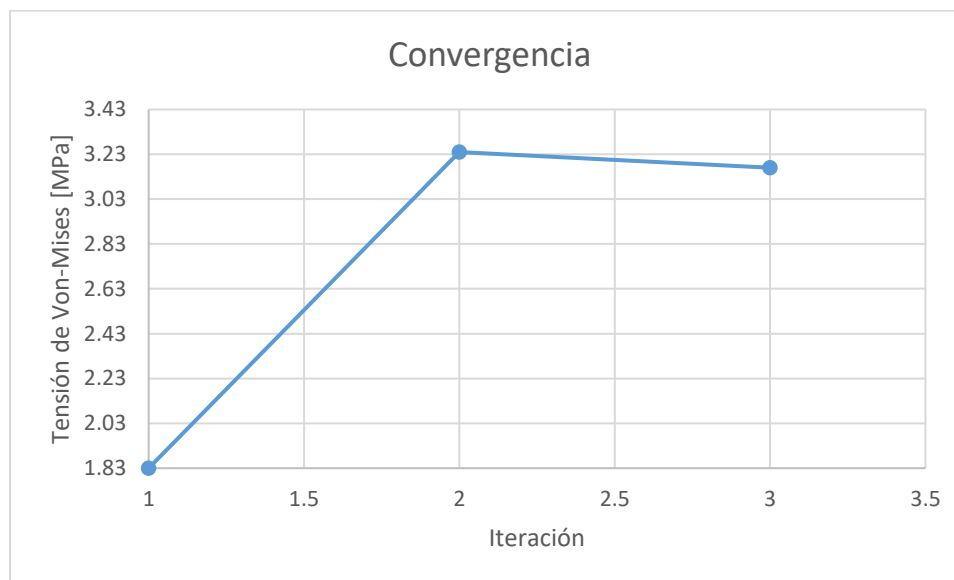
Mallado de la biela



En la Figura 56 se puede observar que los resultados de la Tensión equivalente de Von-Mises tienden a converger en el valor de 3.17 [MPa] al aumentar la densidad de la malla con 16934 elementos y 26233 nodos, con una variación de 2.22%.

Figura 56

Análisis de Convergencia del Mallado para la biela



En la Tabla 25 se observan las Tensiones equivalentes de Von-Mises para los diferentes mallados.

Tabla 25

Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado para la biela

| Iteración | Elementos | Nodos | Tensión [MPa] |
|-----------|-----------|-------|---------------|
| 1 | 2975 | 5252 | 1.83 |
| 2 | 8632 | 13712 | 3.24 |
| 3 | 16934 | 26233 | 3.17 |

Diseño Mecánico de los Elementos Rígidos

Una vez conocido el mecanismo a emplear se optó por desarrollar una arquitectura modular que permita dividir el prototipo en bloques, que deben estar

conformados por pocos elementos funcionales que además se correlacionan de manera directa en su interacción (Ulrich & Eppinger, 2013).

Se dividió en tres bloques funcionales que permitan el reemplazo de las piezas y el mantenimiento preventivo y correctivo. Estos bloques y sus respectivos componentes se detallan en la Tabla 26.

Tabla 26

Detalle de componentes: Análisis de arquitectura modular.

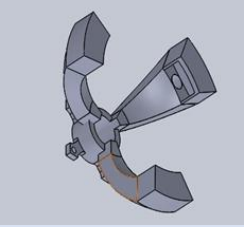
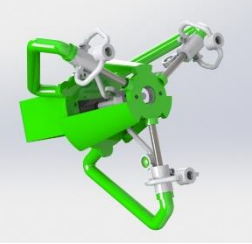


| Elementos del Actuador | Bloques |
|---|--|
| <p>SOPORTE GENERAL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Servomotor de rotación • Mecanismo BRCP |  |
| <p>MECANISMO BRCP</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tornillo Sin Fin 4 hilos • Tuerca de desplazamiento • Bielas de acople • Acople para actuadores blandos y corredera |  |

De acuerdo con el diseño concurrente surgieron especificaciones de funcionalidad por parte de la Visión Artificial y el Control Inteligente las cuales ya se

describieron. Esta adaptación de conceptos generó una evolución del prototipo hasta llegar al final. Estos cambios se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27

Evolución de Conceptos: Prototipos

| Descripción | Ilustración |
|---|---|
| Primer prototipo realizado, sin mecanismo de variación de diámetro. |  |
| <p style="text-align: center;">PROTOTIPO BETA</p> <p style="text-align: center;">Con mecanismo para variación de diámetro.</p> |  |
| Con motor y acople para rotación continua |  |
| Soporte para actuadores blandos con elementos neumáticos |  |

Diseño para Manufactura de la Muñeca

Con el fin de reducir el peso de los eslabones se decidió emplear el método de manufactura aditiva FDM (impresión 3D), puesto que los elementos normalizados como tornillo sin fin, rodamientos, acoples y motor proveen un peso fijo se debe reducir la densidad de los eslabones reduciendo el porcentaje de relleno y así el peso

Tabla 28

Tiempos de impresión con la configuración 2mm-40%

| Pieza | Tiempo de Impresión | Material Depositado | Diseño CAD |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---|
| Soporte General | 2d 13h 27min | 420 g |  |
| Soporte de Actuadores Blandos | 2h 10min | 13 g |  |
| Acople Tuerca-Biela | 1h 20 min | 8 g |  |
| Biela | 22 min | 10 g |  |

3.1.1. Diseño y Construcción del Soporte de la Muñeca

La muñeca diseñada va a acoplarse a un eje Z. Para poder moverse en dicho eje y poder realizar el agarre, se va a diseñar un acople. En la Tabla 29 se puede observar los elementos que van a componer esta estructura.

Tabla 29

Detalle de componentes: Soporte de la Muñeca

| Elemento | Bloque |
|----------|--|
| Eje Z |  |
| Acople |  |

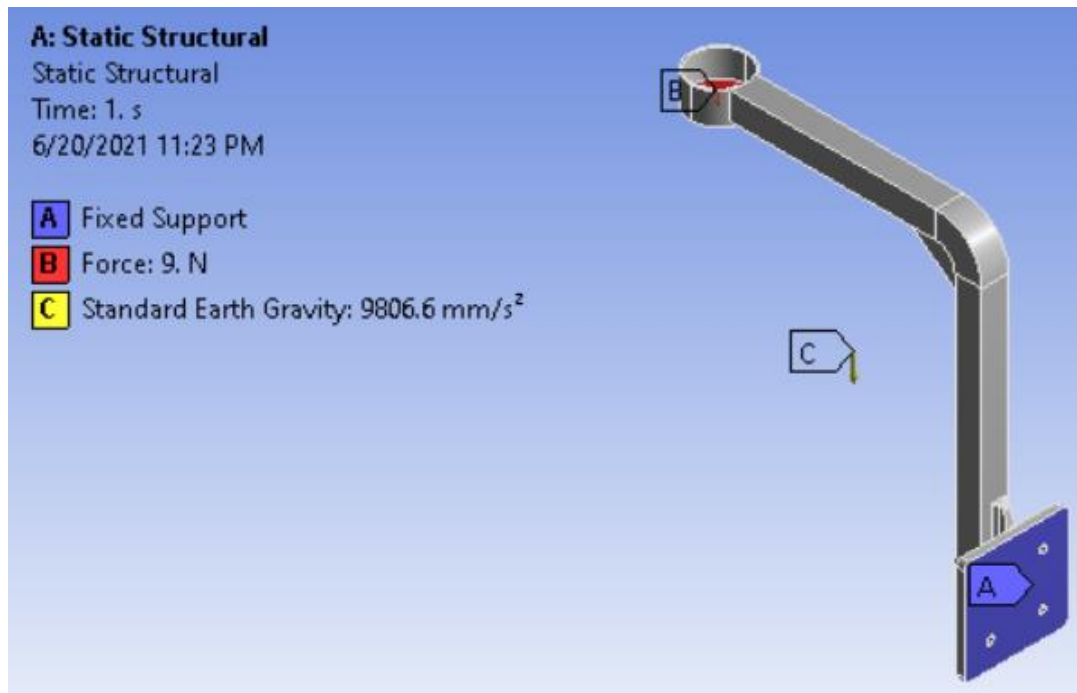
Análisis CAE de la muñeca

El análisis permitirá determinar cómo se va a comportar el acople frente al peso de la muñeca junto a las frutas. Para la simulación se utilizará como material el PLA, usando los datos de las librerías de materiales de ANSYS.

En la Figura 57 se observa las cargas aplicadas sobre el acople. El acople será colocado sobre el eje Z. El peso total de la muñeca, considerando una fruta es de 9 [N]. Finalmente se agrega como consideración la gravedad.

Figura 57

Cargas aplicadas en el soporte



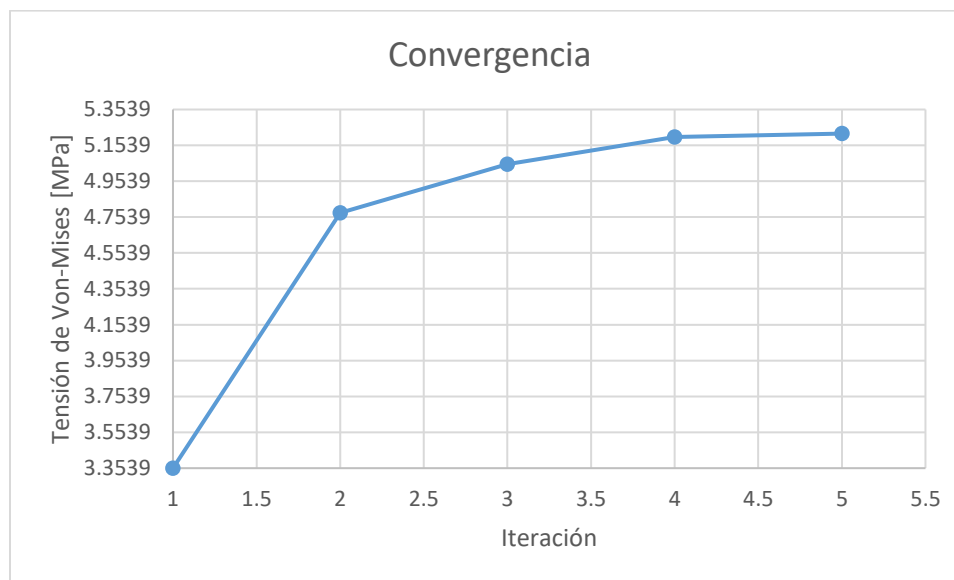
Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación.

- Análisis de Malla y Convergencia

En la Figura 58 se puede observar que los resultados de la Tensión equivalente de Von-Mises tienden a converger en el valor de 5.2194 [MPa] alcanzando una variación de 0.345%.

Figura 58

Análisis de Convergencia del Mallado para el soporte



En la Tabla 30 se observan las Tensiones equivalentes de Von-Mises para los diferentes mallados analizados.

Tabla 30

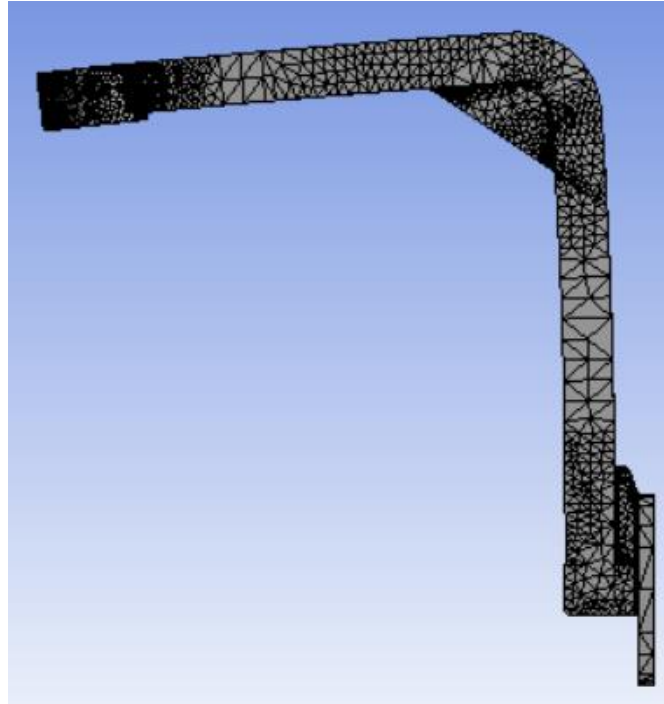
Tensiones equivalentes de Von-Mises y Mallado.

| Iteración | Elementos | Nodos | Tensión [MPa] |
|-----------|-----------|--------|---------------|
| 1 | 4917 | 8873 | 3.3539 |
| 2 | 14734 | 24217 | 4.7779 |
| 3 | 40407 | 63351 | 5.0489 |
| 4 | 88455 | 132644 | 5.2014 |
| 5 | 262356 | 377744 | 5.2194 |

El mallado del soporte fue realizado considerando 262356 elementos y 377744 nodos y es el utilizado para los diferentes resultados. El mallado puede observarse en la Figura 59.

Figura 59

Mallado del soporte

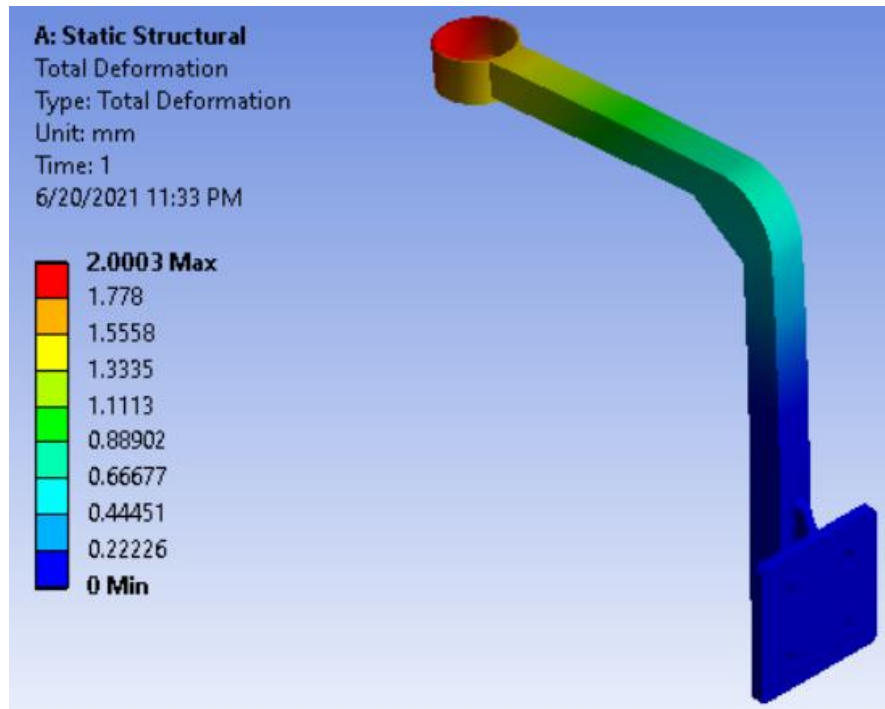


- Estado de Deformación

En la Figura 60 se puede observar el soporte alcanza una deformación máxima de 2.0003 [mm] en la zona donde va a ser apoyada la muñeca.

Figura 60

Estado de Deformación del soporte

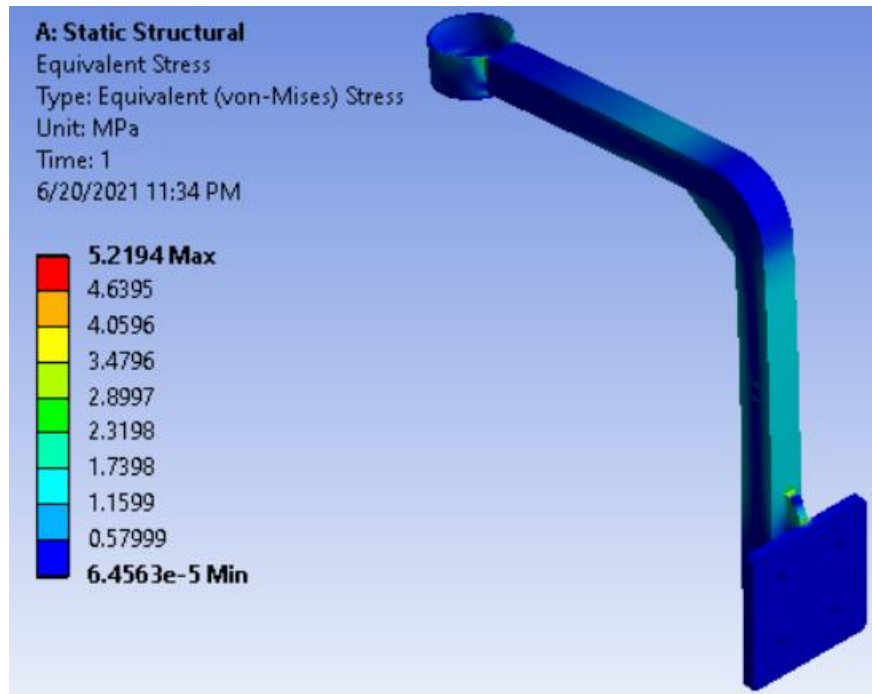


- Tensión de Von-Mises

Como se puede observar en la Figura 61 el soporte alcanzo una Tensión Máxima de Von-Mises de 5.2194 [MPa].

Figura 61

Tensión equivalente de Von-Mises del soporte



- Factor de Seguridad

Como se puede observar en la Figura 62 el actuador blando obtuvo un F.S. máximo de 15 y mínimo de 10.365.

Figura 62


Factor de Seguridad de la muñeca

**Diseño para Manufactura del Soporte para la muñeca**

Se optó por emplear el método de manufactura aditiva FDM (impresión 3D) para la construcción del soporte de la muñeca en el entorno de pruebas que se manejará para la evaluación del sistema en conjunto.

Tabla 31

Tiempos de impresión con la configuración 2mm-40%

| Pieza | Tiempo de Impresión | Material Depositado | Diseño CAD |
|----------------|---------------------|---------------------|---|
| Acople a Eje Z | 19 h | 180 g |  |

Desarrollo del Sistema de Control

Los requerimientos del sistema en cuanto a control fueron en primer lugar un control de presión que permita establecer una resultante de fuerza aplicada necesaria para la movilización de las frutas y el agarre óptimo. Se detallará a continuación el desarrollo del sistema empezando por la instrumentación, la identificación del comportamiento del sistema en lazo abierto, la sintonización y aplicación de un sistema de control clásico óptimo cuya variable controlada es la presión mediante la manipulación de corriente en la entrada de una válvula de control de presión proporcional.

Instrumentación

Para la instrumentación del sistema, así como de los actuadores blandos se realizaron varias pruebas con diferentes sensores orientados a medir distintas variables buscando establecer una relación lógica entre ellas para la comprensión del sistema y poder definir el tipo de control adecuado para realizar un agarre óptimo.

Sensores de Flexión

Estos sensores fueron utilizados para medir la flexión de los actuadores y poder relacionarla con la presión. La Figura 63 muestra el sensor utilizado que presenta las siguientes especificaciones.

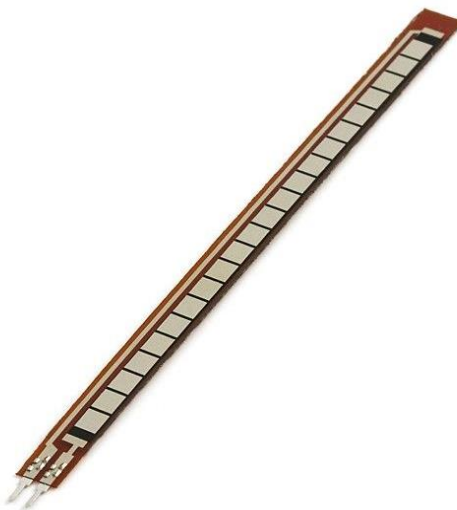
Tabla 32

Especificaciones Generales Sensor de Flexión

| Parámetro | Símbolo | Diseño |
|----------------------|------------|-------------------|
| Tipo | | Resistivo |
| Variable | | Angulo de Flexión |
| Resistencia a 0 rad | R0 | 10 K Ω |
| Rango de Resistencia | ΔR | 60K a 110K Ohms |
| Longitud | L | 2.2" |

Figura 63

Sensor de Flexión de 2.2"



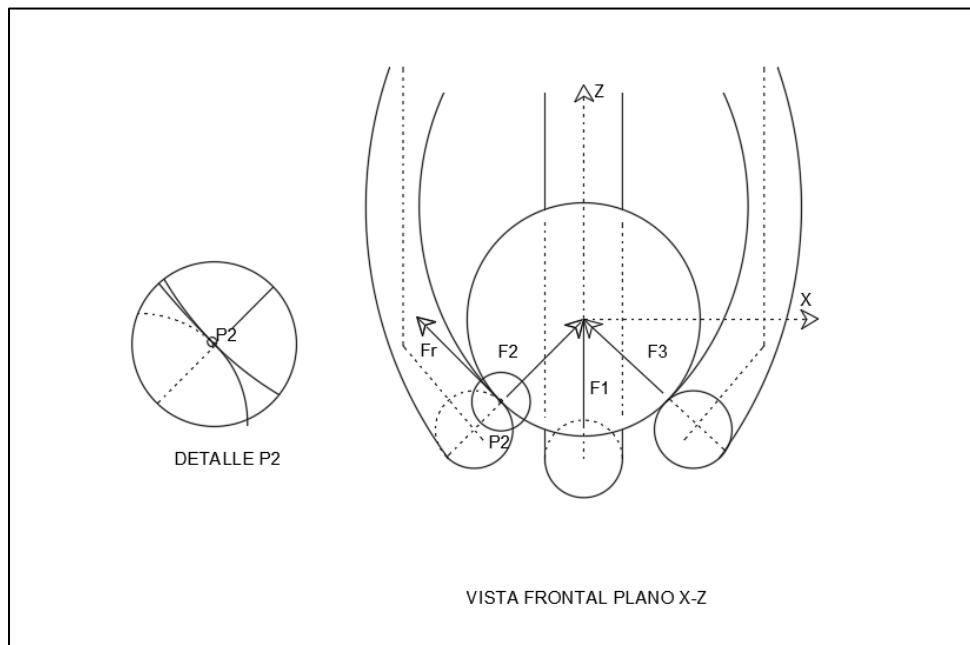
Este sensor fue descartado debido a su influencia directa en la rigidez del actuador blando además de volver frágil las zonas en las que se aloja en el actuador ante el aumento de presión.

Sensores de Fuerza

Otra magnitud que se requería medir fue la fuerza resultante que permitía el desplazamiento de las frutas y el agarre óptimo. El modelo matemático de esta fuerza presentado en la Figura 64 requería la aplicación de sensores en puntos específicos de los frutos.

Figura 64

Dinámica del agarre



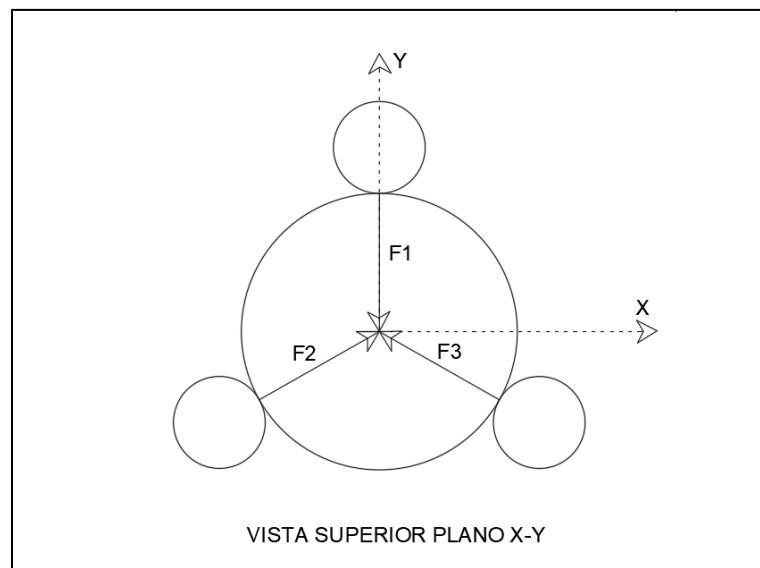
La fuerza de Rozamiento en Z sumado a la reacción en la misma dirección de las fuerzas F_1 , F_2 , F_3 debe sumarse al trasladarse a la línea de acción del eje Z .

Basados en el equilibrio de las fuerzas mencionadas se puede asumir que las

reacciones y componentes de fuerzas se suman directamente y cuando esta suma es mayor al peso del objeto se tiene un traslado optimo del mismo. De igual manera al sumar las reacciones en X e Y, según la Figura 66 se obtiene un equilibrio dinámico basando la fuerza óptima para el agarre netamente en el peso del objeto en este caso la fruta.

Figura 65

Dinámica del agarre Plano X-Y



Analizando el modelo presentado se obtiene una ecuación ideal para definir la resultante de la aplicación de las fuerzas.

$$FR = [(F1 + F2 + F3)\cos(\theta)] * (1 + \mu_s.) \quad (17)$$

Donde:

FR: es la fuerza resultante

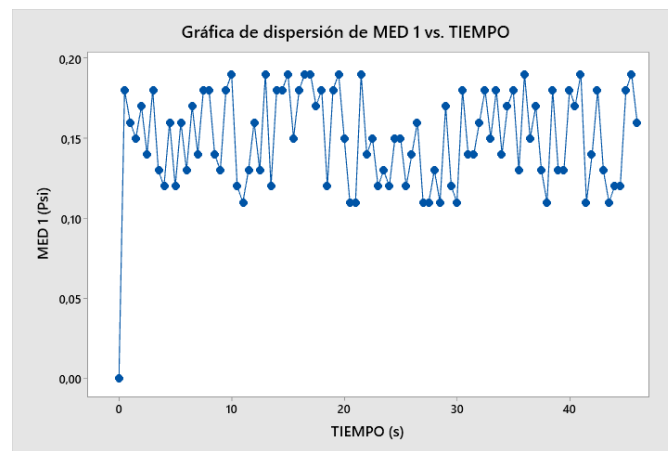
θ : es el ángulo de ataque del actuador. Ideal (45 grados)

μ_s : es el coeficiente de rozamiento estático entre el silicón y frutas.

El comportamiento de los sensores presentó variaciones en las medidas sin poder estabilizar un valor para el análisis de emplearía las medias de 3 mediciones con la misma presión suministrada sobre la misma fruta.

Figura 66

Comportamiento del Sensor de fuerza Nro. 01 ante la entrada de 1 Psi de presión sobre manzana.



Se dio un tratamiento estadístico al sensor para poder encontrar un valor medio admisible para la medición.

Figura 67

Histograma con Curva Normal

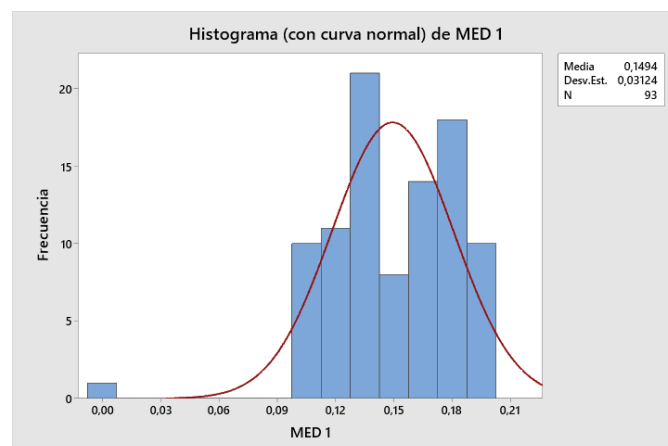
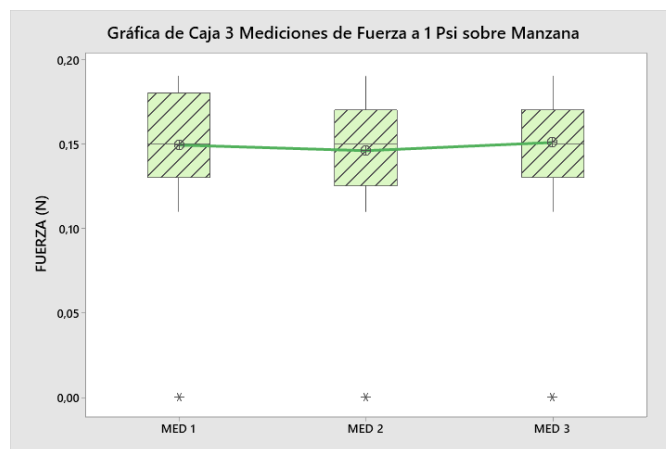


Figura 68

Gráfica de Cajas 3 Mediciones de Fuerza 1 Psi sobre Manzana



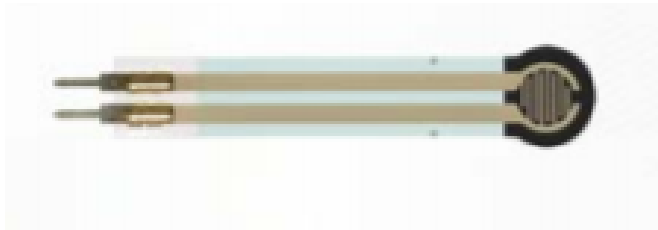
Los sensores se ubicaron tal que puedan medir la fuerzas F1, F2, F3 en el lugar donde se optimiza el agarre, con un ángulo de 45° a partir de la horizontal en el Punto P2 que se muestra en la Figura 64.

La selección de los sensores de fuerza se basó en los errores generados por la geometría de los sensores de flexión, por ello se seleccionaron sensores con geometría circular cuyas especificaciones se muestran a continuación.

Tabla 33

Especificaciones generales Sensor de Fuerza

| Parámetro | Símbolo | Diseño |
|-------------------|---------|---------------|
| Tipo | | Resistivo |
| Variable | F | Fuerza |
| Resistencia a 0 g | F inf | 10 M Ohms |
| Rango de peso | | 10 g a 1000 g |
| Diámetro | D | 5 mm |

Figura 69*Sensor de Fuerza FSR 402 5 mm*

En la Figura 70 se puede observar cómo fueron colocados los sensores de presión en los actuadores blandos.

Figura 70*Ubicación del Sensor en Actuadores Blandos (Dedos)***Sensores de Presión**

Para medir la presión se utilizó un sensor basado en galgas extensiométricas ubicadas en una membrana que se deforma proporcionalmente a la variación de presión en el circuito neumático. El sensor se ubicó en serie con salida de la válvula de control de presión proporcional para tener un registro de la presión que se suministra al

sistema (neumático) y poder establecer una secuencia de agarre con presiones establecidas y que se puedan mantener en el tiempo con una adaptabilidad a ciertas perturbaciones.

Figura 71

Sensor de Presión de membrana



Tabla 34

Especificaciones generales del Sensor de Presión

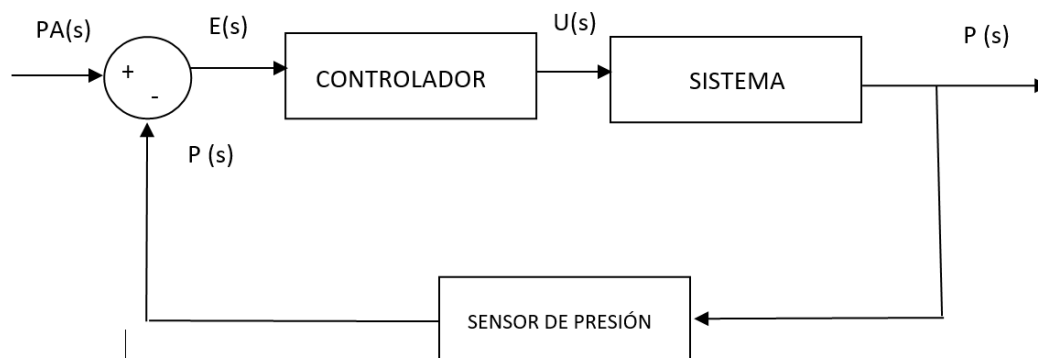
| Parámetro | Símbolo | Diseño |
|-----------------------|----------|-------------|
| Tipo | | Analógico |
| Variable | P | Presión |
| Rango de Señal Salida | V_o | 0,5 a 4,5 V |
| Rango de presión | Pa | |
| Alimentación | V_{in} | 5 V |

Lazo de Control

Para realizar un agarre optimo con los sensores seleccionados se estableció el siguiente lazo de control donde la variable a controlar, en un inicio, fue la fuerza, pero debido a las variaciones en las mediciones y la casi nula repetibilidad de las mismas se optó por controlar la presión pues los resultados en el agarre, presentados en el Capítulo 4 de este trabajo, tuvieron una repetibilidad aceptable y se pudo realizar agarres de varios objetos y frutas.

Figura 72

Lazo De Control De Presión Propuesto



Para el establecimiento del lazo de control se debe, en primer lugar, definir la función de transferencia del sistema que incluye actuadores finales y pre actuadores que dan como salida del sistema la presión general. Se podría hacer una relación de la fuerza resultante aplicada basados en la presión, a manera de un sensor de Fuerza indirecto y eso se tratará de definir como resultado en la correlación de variables. Luego de obtener la función de transferencia se sintonizará un controlador PID que permita

controlar de manera adecuada. La aplicación del lazo cerrado de control se implementó en la tarjeta Arduino y se programó basado en lógica de control digital.

Definición del comportamiento del Sistema mediante Identificación.

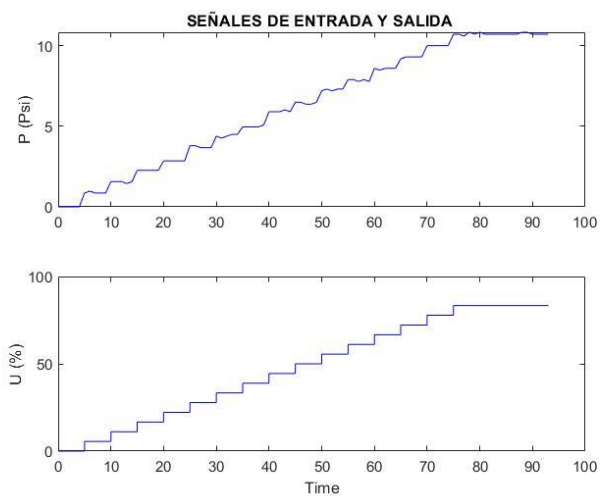
Para este proceso se utilizó un software de procesamiento de datos para identificar el comportamiento del sistema mediante una función de transferencia teniendo como variables de entrada $U(s)$ definida en la

Figura 73 como señal de control que físicamente representa un rango de corriente entre 4 y 20 mA y como salida tenemos una presión en el sistema general que provoca que se aplique una fuerza.

Para este propósito se tomaron datos de salida variando la entrada con un tiempo de muestreo que se estimó basado en el tiempo de transición del actuador de control (Válvula de Control de Presión Proporcional) quedando un tiempo aproximado a un segundo con un sistema de velocidad intermedia. Luego se procesa la información en el software de estimación de comportamiento en función de la frecuencia obteniendo los siguientes resultados.

Figura 73

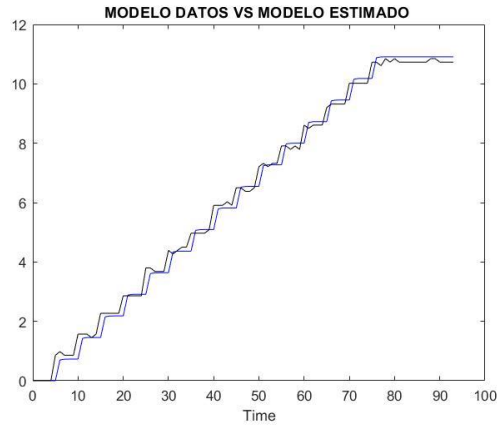
Datos de señal de Entrada y Salida vs. Tiempo



Estimación de función de transferencia en función de Frecuencia con un modelo de planta de segundo orden con dos polos y ningún 0.

Figura 74

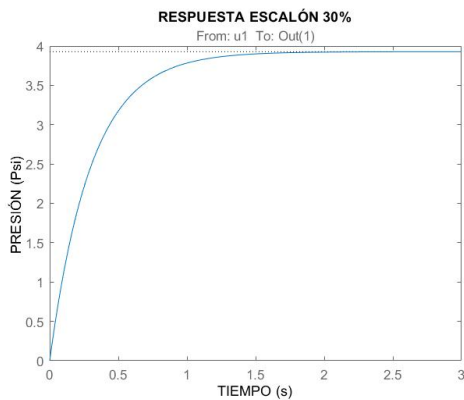
Modelo estimado vs Modelo real digitalizado



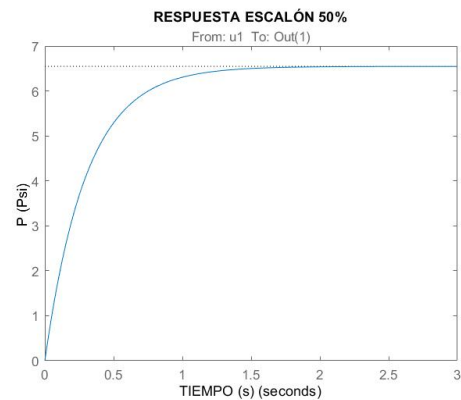
La función de transferencia obtenida de esta estimación se acerca en un 91% al comportamiento del sistema, se realizaron pruebas para el 30% 50% y 70% para observar la adaptabilidad de la función de transferencia en cuanto a estado estable y a la transitoria.

Figura 75

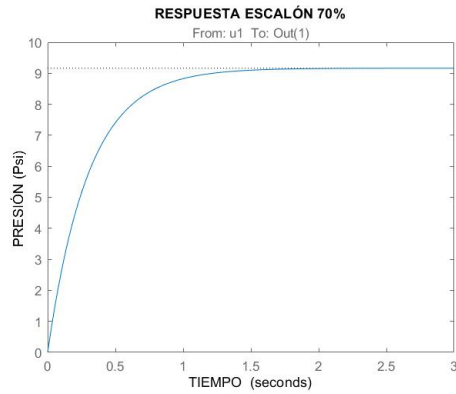
Respuestas al Escalón Unitario con diferentes porcentajes de Ciclo de trabajo y Comparación de Respuestas al Escalón Real vs Estimada.



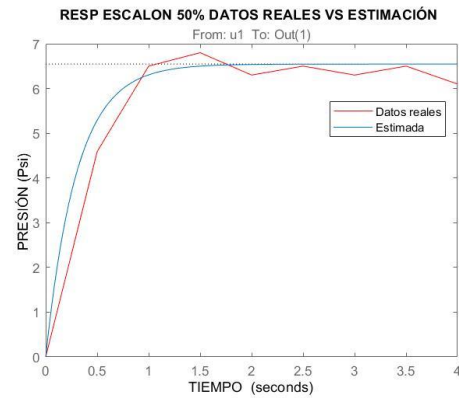
A)



B)



C)



D)

Nota: A) Ciclo de Trabajo al 30%. B) Ciclo de Trabajo al 50%. C) Ciclo de Trabajo al 70%. D) Comparación de Respuesta al Escalón Real vs Estimada.

Figura 76

Función de transferencia estimada del Sistema (Tf1)

$$\frac{1494}{s^2 + 3457 s + 1.141e04}$$

Sintonización de Controlador

Se utilizó software dedicado a Sistema de Control para evaluar el comportamiento del sistema a la aplicación de distintos tipos de controladores y el

resultado más óptimo en función a las características esperadas del sistema fue un controlador PI.

Tabla 35

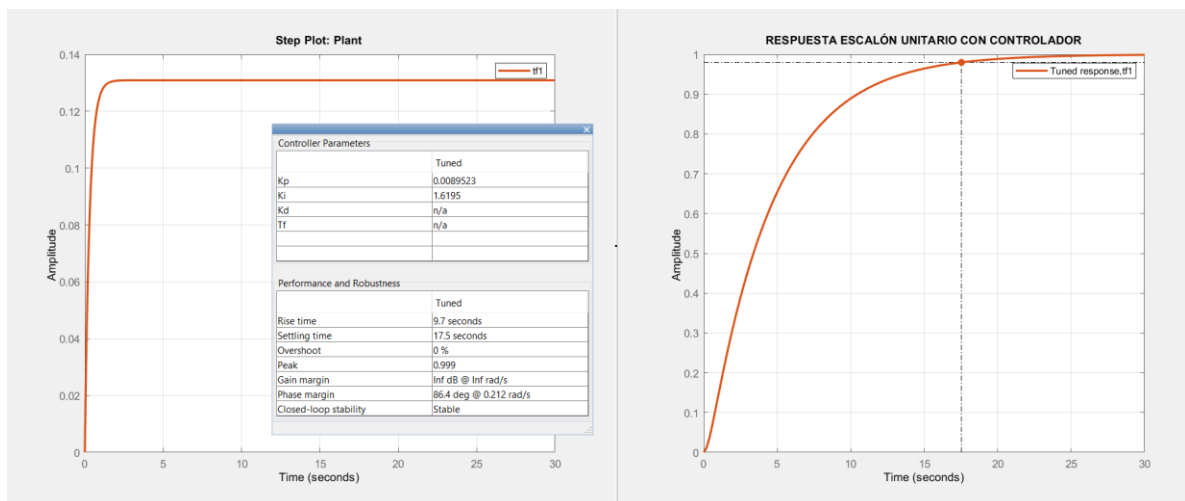
Parámetros para la sintonización de Controlador

| Parámetro | Símbolo | Diseño |
|---------------------------|---------|----------|
| Tiempo de Establecimiento | T_s | < 25 s |
| Sobre impulso | M_p | $< 5\%$ |
| Error estado estable | E | $< 2\%$ |

Respuestas al controlador sintonizado mediante un PID no fue el esperado y se sintonizó un controlador PI que cumplió con satisfacción los parámetros delimitados para el control.

Figura 77

Respuesta al Escalón unitario en lazo cerrado con controlador y sin controlador PI, parámetros sintonizados.



El controlador cumple con las especificaciones solicitadas y tiene una respuesta muy suave sin sobre impulso y en el tiempo establecido con las siguientes características y función de transferencia.

Tabla 36

Tabla de comparación de parámetros esperado vs. diseñado

| Parámetro | Símbolo | Esperado | Diseño |
|---------------------------|---------|----------|--------|
| Tiempo de Establecimiento | Ts | <2.5 s | 17.5 s |
| Sobre impulso | Mp | < 5% | 0% |
| Error estado estable | E | < 2% | 0% |

La función de transferencia del Controlador Sintonizado se presenta a continuación, fue aplicado e implementado en un controlador tipo Arduino. El esquema eléctrico de control se muestra en los anexos del presente trabajo.

Figura 78

Función de transferencia del controlador PI

$$K_p + K_i * \frac{1}{s}$$

$$\text{with } K_p = 0.00895, K_i = 1.62$$

Desarrollo del Hardware electrónico

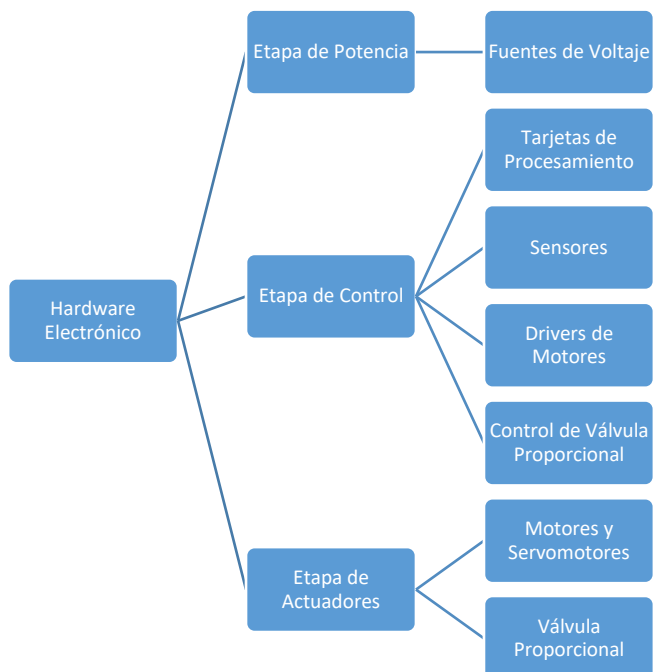
El subsistema de hardware electrónico engloba todos los requerimientos electrónicos del proyecto como lo son los actuadores, los sensores y los circuitos de control para permitir el funcionamiento del sistema.

Diseño del Circuito Electrónico

El diseño del circuito electrónico consta de 3 etapas las cuáles pueden observarse en la Figura 79. La etapa de potencia responde al voltaje y corriente de alimentación que van a requerir los diferentes actuadores para la selección de fuentes de alimentación. La etapa de control considera los componentes que van a permitir el procesamiento de los datos obtenido de los sensores y los circuitos que van a permitir el funcionamiento de los actuadores, como lo son los drivers y tarjetas de procesamiento. Finalmente, la etapa de actuadores muestra los actuadores seleccionados por el sistema los cuales van a responder a los requerimientos mecánicos expuestos en la sección 3.1.

Figura 79

Componentes del subsistema Hardware Electrónico



Etapa de Actuadores

Tomando en cuenta los cálculos de torque obtenidos a partir del modelamiento matemático en la sección 3.1 es posible escoger un modelo de motor que pueda satisfacer las necesidades del sistema. En primera instancia se va a trabajar con un motor a pasos NEMA 17 para poder regular la apertura de la muñeca con alta precisión. En segunda instancia se utilizarán servomotores de rotación continua para poder controlar la posición de la muñeca sobre las frutas al momento de realizar las diferentes pruebas. En la

Tabla 37 se encuentran los motores y servomotores utilizados en el presente proyecto.

Tabla 37

Motores utilizados en el proyecto

| | Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|---------|----------------------|--|---|
| Motores | 0K42HB40-1204A-TJ750 | <ul style="list-style-type: none"> • Ángulo de Paso: 1.8° • Voltaje: 12 V • Corriente: 1.2 A • Torque de Retención: 0.45 Nm |  |
| | Servo Motor MG995 | <ul style="list-style-type: none"> • Rotación Continua • Voltaje: 6 V • Torque de Retención: 0.98 Nm • Velocidad: 0.16 s/60° |  |

Las especificaciones técnicas de la Válvula de Control Proporcional se encuentran presentadas en la Tabla 18 en la sección 3.1.

Etapa de Control

El presente proyecto requiere la selección de una tarjeta de procesamiento que pueda realizar las tareas de control y responda al requerimiento de un sistema embebido para la implementación de algoritmos de visión artificial. Es así que se presentan 2 alternativas las cuales son la Raspberry Pi 4 y la NVIDIA Jetson Nano.

Tabla 38

Selección de Conceptos: Tarjeta de Procesamiento

| Criterios de Selección | Raspberry Pi 4 | NVIDIA Jetson Nano |
|--------------------------------|----------------|--------------------|
| GPU Integrada | - | + |
| E/S para sensores y actuadores | + | + |
| Entradas Analógicas | - | - |
| Programación con ROS | + | + |
| Costo | + | 0 |
| Suma + | 3 | 3 |
| Suma 0 | 0 | 1 |
| Suma - | 2 | 1 |
| Evaluación Neta | 1 | 2 |
| Lugar 1 | 2 | 1 |
| ¿Continuar? | No | Si |

Tabla 39

Evaluación de Conceptos: Tarjeta de Procesamiento

| Criterios de Selección | Raspberry Pi 4 | | | NVIDIA Jetson Nano | |
|--------------------------------|----------------|--------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | Peso | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| GPU Integrada | 50% | 1 | 0.5 | 5 | 2.5 |
| E/S para sensores y actuadores | 15% | 5 | 0.75 | 5 | 0.75 |
| Entradas Analógicas | 10% | 1 | 0.1 | 1 | 0.1 |
| Programación con ROS | 15% | 5 | 0.75 | 5 | 0.75 |
| Costo | 10% | 5 | 0.5 | 3 | 0.3 |
| Total Puntos | | | 2.6 | | 4.4 |
| Lugar | | | 2 | | 1 |

| | Raspberry Pi 4 | NVIDIA Jetson Nano |
|-------------|----------------|--------------------|
| ¿Continuar? | No | Desarrollar |

De acuerdo a los resultados dados por la

Tabla 38 y Tabla 39 se decidió que se va a trabajar con la NVIDIA Jetson Nano.

El sensor de presión será conectado al Arduino Nano. Dentro del Arduino se programará para convertir los datos de voltaje en valores de presión.

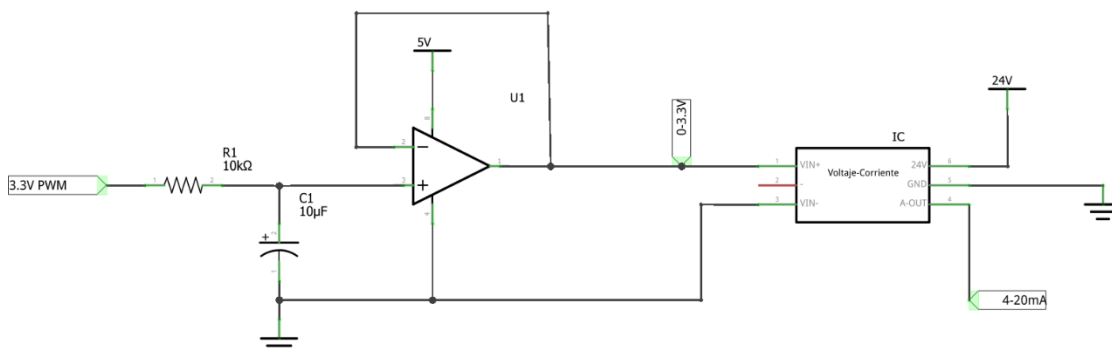
Para poder controlar el motor a pasos se utilizará el driver A4988. Por otra parte, para poder controlar los servomotores de rotación continua se utilizará el módulo controlador de servos PCA9685. Este módulo permite la conexión de hasta 16 servos.

Finalmente, para poder trabajar con la válvula reguladora de presión se necesitará trabajar con un circuito de acondicionamiento que convierta la señal PWM del microcontrolador en voltaje y luego en una corriente de 4 a 20 mA.

La señal PWM será enviada a un filtro pasabajos y a un amplificador operacional para obtener una salida de voltaje variable. Luego esta señal será enviada a un módulo de conversión de voltaje a corriente. Se optó por usar este módulo para evitar picos de corrientes, tener un control más preciso y evitar daños sobre la válvula. En la Figura 80 se observa el circuito implementado.

Figura 80

Circuito conversor PWM a Corriente




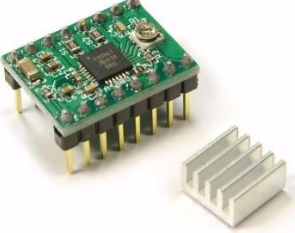





En la Tabla 40 se encuentran las características técnicas de los elementos que componen la etapa de control.

Tabla 40

Componentes eléctricos utilizados en el proyecto

| Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|--|---|-------------|
| Tarjetas de Procesamiento NVIDIA Jetson Nano | <ul style="list-style-type: none"> GPU: Arquitectura NVIDIA Maxwell con 128 núcleos NVIDIA CUDA® CPU: Procesador Quad-core ARM Cortex-A57 MPCore Alimentación: 5 V Corriente de Operación: 2 A o 4 A. Memoria 4 GB 4 puertos USB 3.0, 2.0 Micro – B | |

| Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|---|---|---|
| <p data-bbox="418 541 604 573">Arduino Nano</p> | <ul data-bbox="716 285 992 705" style="list-style-type: none"> • 40 pines de propósito general • Voltaje de Operación: 5 V • E/S Analógicas: 8 • E/S Digitales: 22 • Consumo Energía: 19 mA |  |
| <p data-bbox="444 863 581 940">ESP8266 NodeMCU</p> | <ul data-bbox="716 789 1019 1020" style="list-style-type: none"> • Voltaje de Operación: 5 V • Pin Analógico ADC: • E/S Digitales: 17 • WiFi Direct P2P |  |
| <p data-bbox="305 1182 337 1308">Sensores</p> <p data-bbox="391 1224 636 1255">Sensor de Presión</p> | <ul data-bbox="716 1182 1032 1308" style="list-style-type: none"> • Salida de Voltaje Lineal 0.5V - 4.5V. • Presión: 0 – 100 PSI |  |
| <p data-bbox="305 1514 337 1801">Drivers de Actuadores</p> <p data-bbox="467 1633 555 1665">A4988</p> | <ul data-bbox="716 1434 1032 1864" style="list-style-type: none"> • Voltaje de Operación: 8 – 35 V • Voltaje Lógico: 3.3 – 5 V • Corriente: 2 A (por bobina) • Microstepping: Complejo, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 |  |



| | Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| | PCA9685 | <ul style="list-style-type: none"> • Control PWM por medio de I2C • Voltaje de Operación: 5 V • Voltaje Lógico: 3.3 – 5 V • Conexión de hasta 16 servos |  |
| | Relay | <ul style="list-style-type: none"> • Corriente Máxima: 10 A • Voltaje Máximo: 30V. • Voltaje Digital: 5 V |  |
| Control para Válvula Proporcional | Módulo Conversor Voltaje a Corriente | <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de Operación: 12–24 V • Convierte señales de voltaje (0-2.5V, 0-3.3V, 0-5V, 0-10V, 0-15V, 0-24V) a corriente (4-20mA) • Salida de corriente lineal • Calibración por medio de 2 potenciómetros integrados |  |

Etapa de Potencia

Una vez seleccionado los diferentes actuadores junto a sus elementos de control se tiene claro los requerimientos de potencia del sistema. En base a esto es posible seleccionar las fuentes de voltaje adecuadas para el funcionamiento del sistema. En la Tabla 41 se encuentran sus características técnicas.

Tabla 41

Fuentes de Voltaje utilizadas en el proyecto

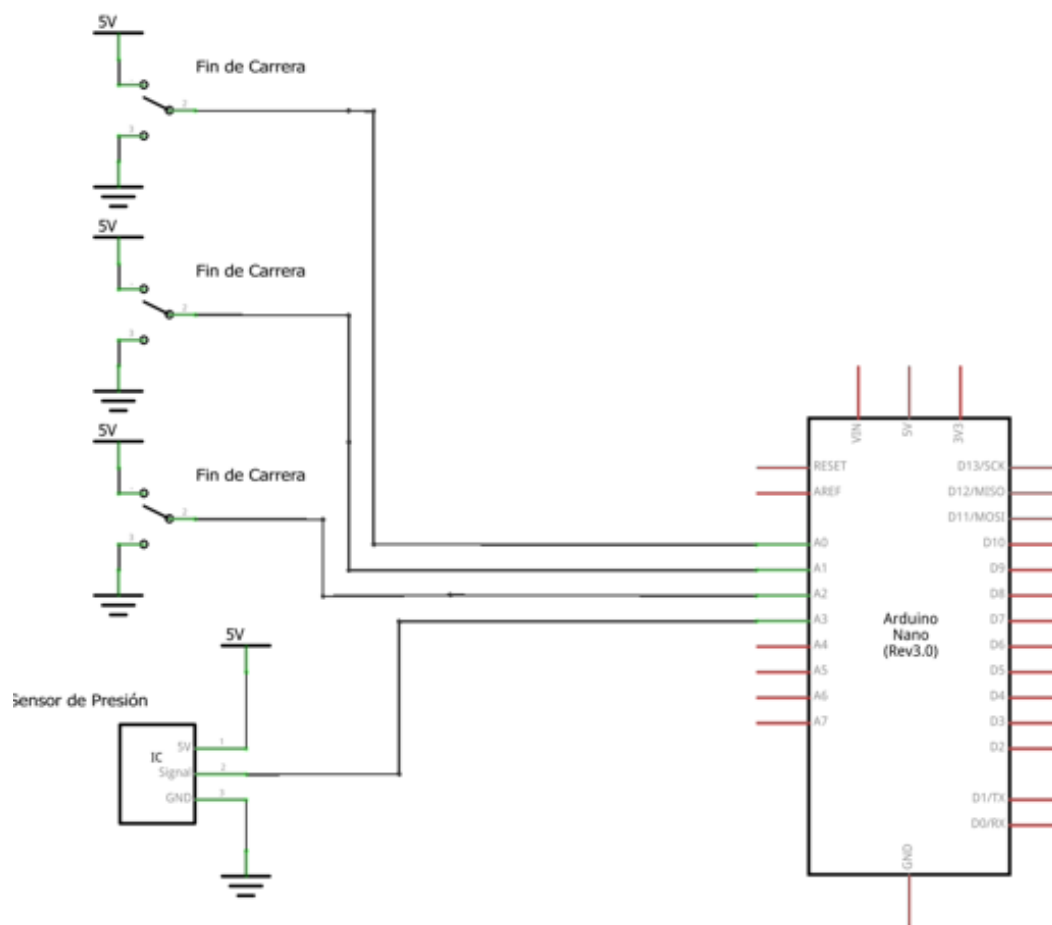
| Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|----------------|--|---|
| S-75-24 | <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de Entrada: 110/220 V AC • Voltaje de Salida: 24 V DC • Corriente Máxima: 3A |  |
| ATX-750 | <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de Entrada: 110/220 V AC • Voltaje de Salida: 3.3V, 5V, 12V DC • Corriente Máxima: 30A |  |

Construcción del circuito de control

En la Figura 81 se muestra el esquema de conexión de los fines de carrera y del sensor de presión.

Figura 81

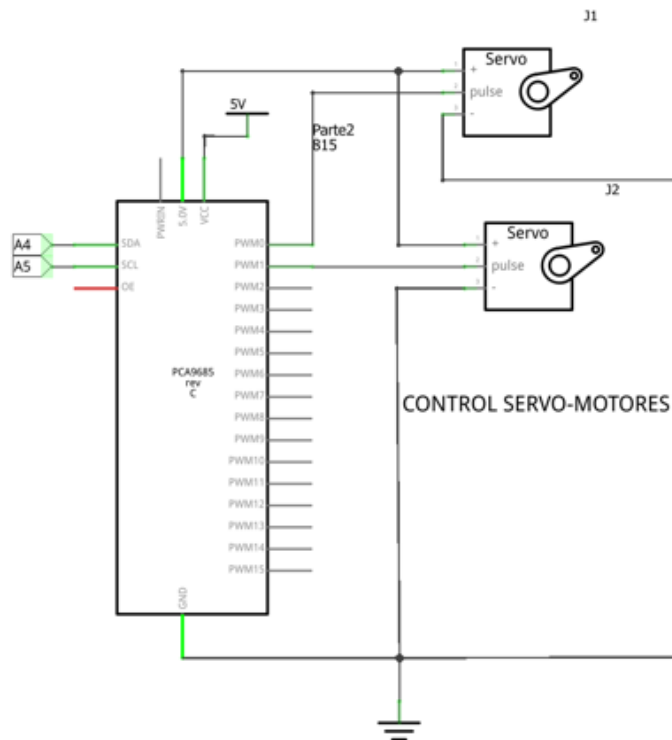
Conexión de los Fines de Carrera y del Sensor de Presión



En la Figura 82 se muestra el esquema de conexión de los servos motores.

Figura 82

Conexión de los Servo Motores

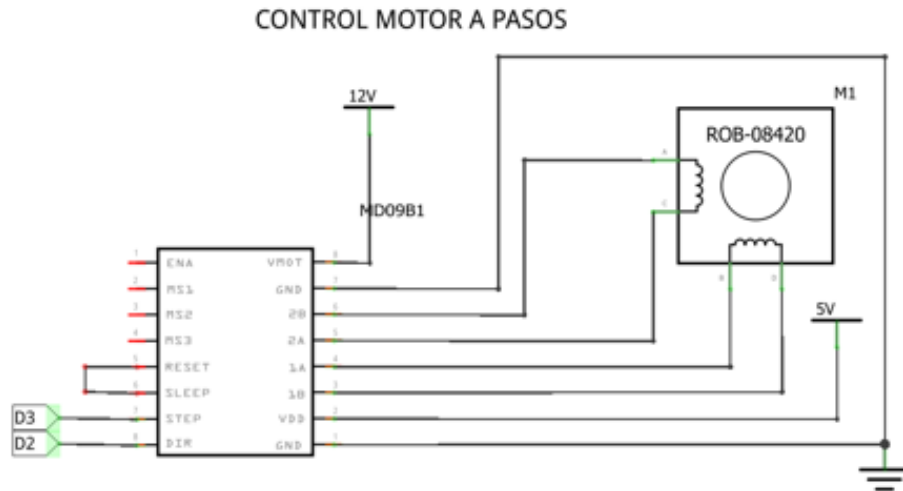


Nota. A4 y A5 hacen referencia a la entrada Analógica del Arduino Nano.

En la Figura 83 se muestra el esquema de conexión del motor a pasos.

Figura 83

Conexión del Motor a Pasos

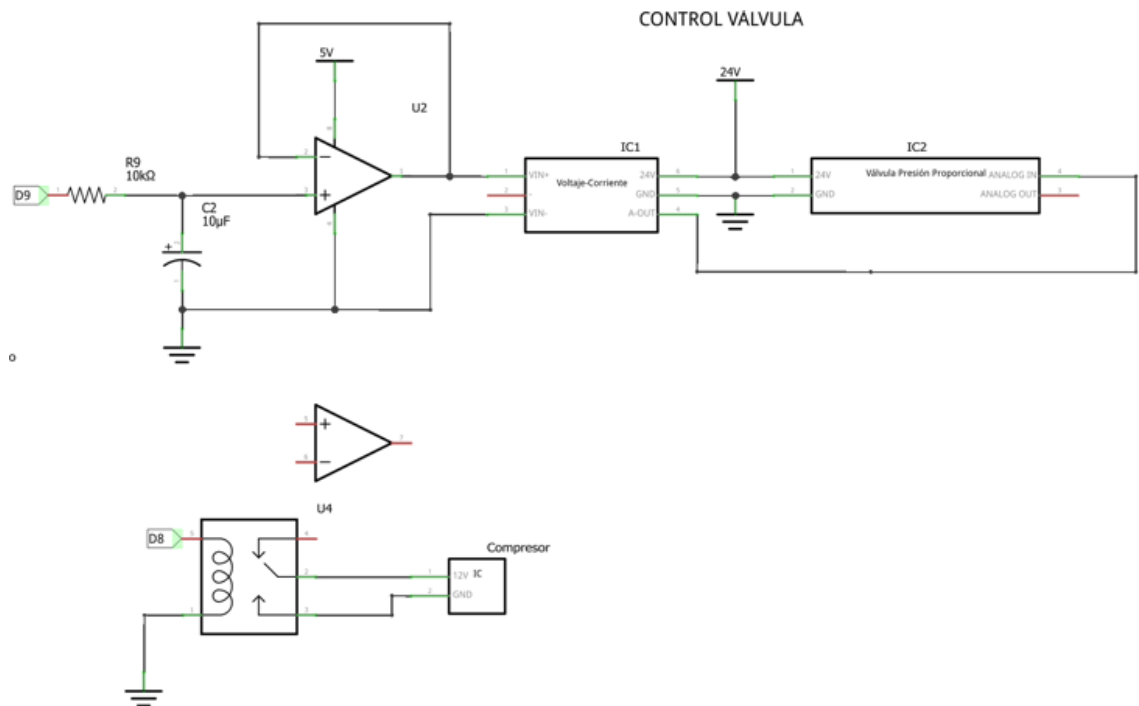


Nota. D2 y D3 hacen referencia a los pines digitales del Arduino Nano.

En la Figura 84 se muestra el esquema de conexión de todos los componentes electrónicos presentados anteriormente.

Figura 84

Conexión del Circuito para el Control de la Válvula y del Compresor

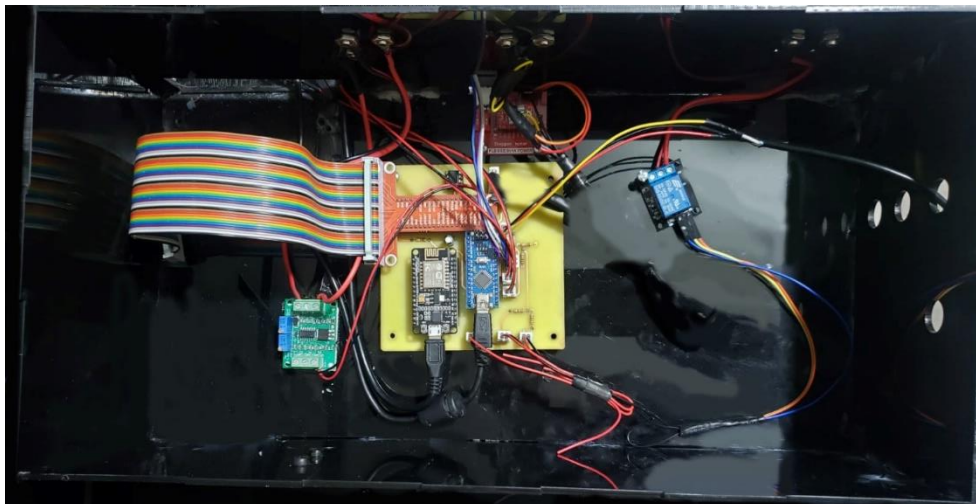


Nota. D8 y D9 hacen referencia a los pines digitales del Arduino Nano.

En el Anexo 3 se encuentra una imagen del Esquema de Conexión General.

La NVIDIA Jetson Nano será conectada por el puerto Serial a una ESP8266. Por otra parte, el Arduino Nano será conectado a la computadora, igualmente por comunicación Serial. Se hablará sobre esta conexión en el Capítulo 3.5.

En la Figura 85 se muestra el tablero de control implementado.

Figura 85*Tablero de Control***Desarrollo del sistema de visión artificial**

El subsistema de visión artificial engloba algoritmos que van a permitir detectar objetos a partir de imágenes de video, en este caso, frutas. Los algoritmos presentados van a ser programados en Python junto a la librería de OpenCV, el framework Pytorch y herramientas propias de la NVIDIA Jetson Nano como detectNet.

Selección de Cámara

Para el funcionamiento del sistema de visión artificial es necesario la utilización de una cámara. Es así que se presentan 2 alternativas las cuales son una cámara con conexión USB y un cámara con conexión CSI.

Tabla 42*Selección de Conceptos: Cámara*

| Criterios de Selección | Cámara USB | Cámara CSI |
|--------------------------------|------------|------------|
| Trabajo con el GPU | - | + |
| Cuadros por segundo | 0 | + |
| Video en tiempo real | 0 | + |
| Soporte con Sistemas Embebidos | + | + |
| Costo | - | + |
| Suma + | 1 | 5 |
| Suma 0 | 2 | 0 |
| Suma - | 2 | 0 |
| Evaluación Neta | -1 | 5 |
| Lugar 1 | 2 | 1 |
| ¿Continuar? | No | Si |

Tabla 43*Evaluación de Conceptos: Cámara*

| Criterios de Selección | Peso | Cámara USB | | Cámara CSI | |
|--------------------------------|------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
| | | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Trabajo con el GPU | 30% | 2 | 0.6 | 5 | 1.5 |
| Cuadros por segundo | 30% | 3 | 0.9 | 5 | 1.5 |
| Video en tiempo real | 30% | 3 | 0.9 | 5 | 1.5 |
| Soporte con Sistemas Embebidos | 15% | 5 | 0.75 | 5 | 0.75 |

| | | Cámara USB | | Cámara CSI | |
|--------------------|-----|------------|------|-------------|------|
| Trabajo con el GPU | 15% | 1 | 0.15 | 5 | 0.75 |
| Total Puntos | | 3.3 | | 6 | |
| Lugar | | 2 | | 1 | |
| ¿Continuar? | | No | | Desarrollar | |


De acuerdo a los resultados dados por la

Tabla 42 y Tabla 43 se decidió que se va a trabajar con una cámara CSI. Las cámaras CSI (Camera Serial Interface) es un protocolo de transmisión de video de alta velocidad entre una cámara y un dispositivo. Esta velocidad es alcanzada ya que trabaja directamente sobre el GPU del dispositivo.

Para el presente trabajo se va a trabajar con la cámara CSI Waveshare IMX219-200 y cuenta con soporte para la Jetson Nano. En la Tabla 44 se observan sus especificaciones.

Tabla 44

Cámara para el sistema de Visión Artificial

| Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|----------------------|--|---|
| Waveshare IMX219-200 | <ul style="list-style-type: none"> Resolución 8 Megapíxeles Soporte para Jetson Nano Ángulo de Visión de 200° FOV |  |

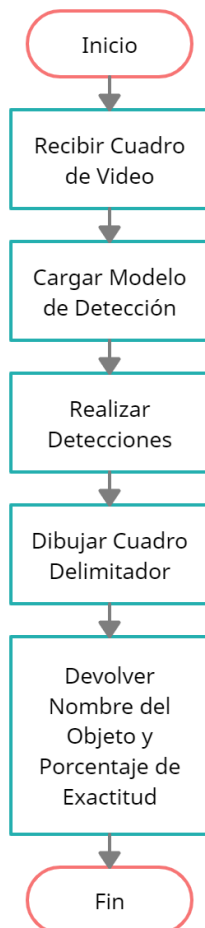
| Denominación | Especificaciones | Ilustración |
|--------------|---|-------------|
| | <ul style="list-style-type: none">• Conexión a luces infrarrojas para trabajos nocturnos• Conexión CSI• Ideal para trabajos de AI | |

Algoritmo de Detección de Objetos

En la Figura 86 se encuentra el flujograma con el algoritmo implementado. Para el presente trabajo se utilizarán los modelos de detección de YOLO y SSD-Mobilnet para poder determinar el modelo que se adapte de mejor manera a lo propuesto. Los 2 modelos de detección trabajaran con el mismo algoritmo.

Figura 86

Algoritmo de Detección de Objetos



Nota: El algoritmo describe a las funciones `detectorSSD()` y `detectorYOLO()`.

Detección de Objetos con YOLO

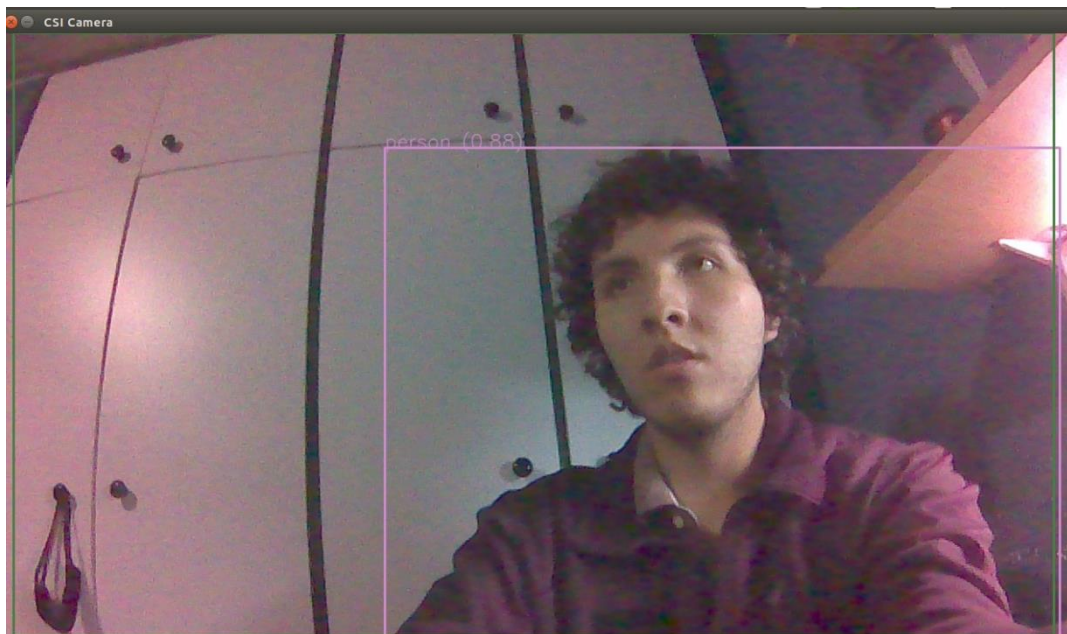
El algoritmo trabaja con el framework Pytorch y OpenCV. Pytorch es un framework de código abierto dedicado a tareas de Machine y Deep Learning, más específicamente, la programación de redes neuronales. Por otra parte, OpenCV es una librería de código abierto utilizado para tareas de visión artificial.

Una vez cargado el modelo el algoritmo realizará las detecciones, además de agregar cajas delimitadoras sobre los objetos detectados, indicar su nombre y el porcentaje de exactitud.

En la Figura 87 se encuentra el resultado del algoritmo propuesto utilizando YOLO.

Figura 87

Detección de Objetos con YOLO



Nota. El modelo de prueba utilizado es el entrenado por Ultralytics.

Detección de Objetos con SSD-Mobilnet

El algoritmo trabaja con la función `detectNet()`. La función de `detectNet` se encarga de cargar el modelo y realizar las detecciones además de agregar cajas delimitadoras sobre los objetos detectados, indicar su nombre y el porcentaje de exactitud. Las conversiones de RGB a RGBA y viceversa, son para permitir que la función trabaje con OpenCV y con el algoritmo de medición de diámetro.

En la Figura 88 se encuentra el resultado del algoritmo propuesto utilizando SSD-Mobilnet.

Figura 88

Detección de objetos con SSD-MobileNet



Nota. El modelo de prueba utilizado es el “ssd-mobilenet-v2” previamente entrenado por NVIDIA. Realizó la detección de una persona.

Los algoritmos presentados se pueden encontrar en el Anexo 4.

Aprendizaje de Máquina para Detección de Frutas

Los modelos de YOLO y SSD MobileNet trabajan utilizando algoritmos que toman como base al Aprendizaje de Máquina, más específicamente al Aprendizaje Profundo. El Aprendizaje Profundo puede considerarse como una evolución del Aprendizaje de Máquina y son algoritmos que permiten al sistema trabajar en el área de aprendizaje no supervisado permitiendo que el sistema pueda aprender desde la experiencia y sin ninguna intervención.

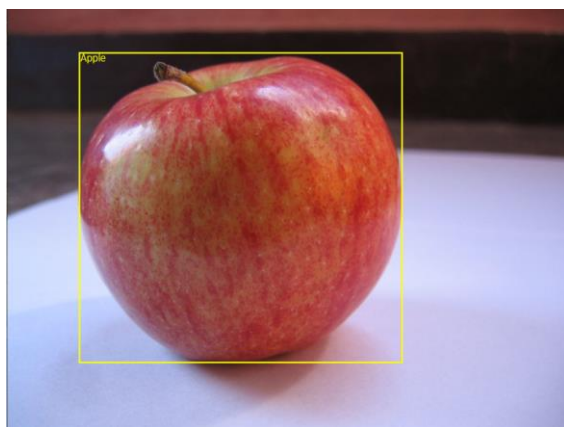
Como se mencionó en el capítulo anterior los algoritmos de Deep Learning trabajan con varias capas de neuronas que van a extraer las características de una manera más refinada y fina de la entrada obtenida.

En el caso de la Visión Artificial el Aprendizaje Profundo permite que el sistema sea capaz de aprender a reconocer imágenes y además darles un significado a partir de los datos que extrajeron las capas de neuronas. Esto puede ser observado en los modelos de redes neuronales utilizados para entrenar con YOLO o SSD MobileNet.

La manera en que es realizado el entrenamiento es utilizando dos elementos. El primero es el dataset de imágenes con sus respectivos cuadrados delimitadores y el segundo es el archivo de texto con el nombre de los objetos a ser entrenados.

Figura 89

Entrenamiento para Detección de Objetos



A)

Manzana
Naranja
Banana
Fresa
Uva
Pera
Piña
Sandía

B)

Nota. A) Objeto a detectar con su cuadro delimitador. B) Lista con los objetos a ser entrenados.

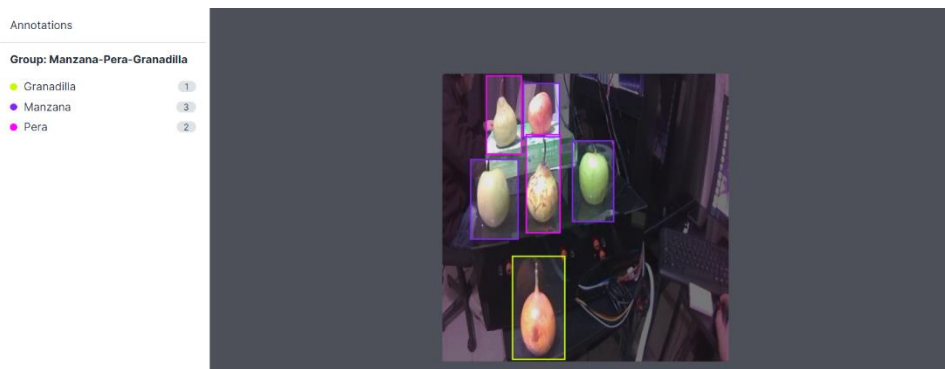
Las imágenes con sus respectivos cuadros delimitadores van a estar guardados en un tipo de archivo en el que va a estar almacenada información de la imagen, como

la altura, ancho, posición en X y Y de los cuadros delimitadores y el nombre del objeto dentro del cuadro (dicho nombre debe coincidir con el del archivo de texto).

Con el objetivo de demostrar que los modelos pueden ser entrenados para detectar cualquier fruta se va a construir un dataset con un total de 500 imágenes propias de manzanas, peras y granadillas, respectivamente. En la Figura 90 se puede apreciar el proceso de agregar cuadros delimitadores para construir el dataset.

Figura 90

Preparación de Cuadros Delimitadores



Nota. Para agregar los cuadros delimitadores se utilizó la herramienta Roboflow.

Teniendo esto se va a cargar el dataset junto al documento de texto dentro del modelo de redes neuronales (YOLO o SSD MobileNet) y estos modelos van a realizar las operaciones necesarias para poder extraer las características. Una vez acabado esto se va a obtener un modelo para poder realizar la detección objetos en imágenes o videos.

Figura 91

Finalización del entrenamiento de un modelo de Red Neuronal

```

2020-07-10 13:14:12 - Epoch: 0, Step: 10/1287, Avg Loss: 12.4240, Avg Regression Loss 3.5747, Avg Classification Loss: 8.8493
2020-07-10 13:14:12 - Epoch: 0, Step: 20/1287, Avg Loss: 9.6947, Avg Regression Loss 4.1911, Avg Classification Loss: 5.5036
2020-07-10 13:14:13 - Epoch: 0, Step: 30/1287, Avg Loss: 8.7409, Avg Regression Loss 3.4078, Avg Classification Loss: 5.3332
2020-07-10 13:14:13 - Epoch: 0, Step: 40/1287, Avg Loss: 7.3736, Avg Regression Loss 2.5356, Avg Classification Loss: 4.8379
2020-07-10 13:14:14 - Epoch: 0, Step: 50/1287, Avg Loss: 6.3461, Avg Regression Loss 2.2286, Avg Classification Loss: 4.1175
...
2020-07-10 13:19:26 - Epoch: 0, Validation Loss: 5.6730, Validation Regression Loss 1.7096, Validation Classification Loss: 3.9634
2020-07-10 13:19:26 - Saved model models/fruit/mb1-ssd-Epoch-0-Loss-5.672993580500285.pth

```

Nota. El modelo resultante fue entrenado en la red neuronal SSD MobileNet

Para el presente trabajo se utilizarán los algoritmos de Aprendizaje Profundo para poder detectar frutas y esa información será utilizada para determinar el agarre óptimo que estas frutas requieran.

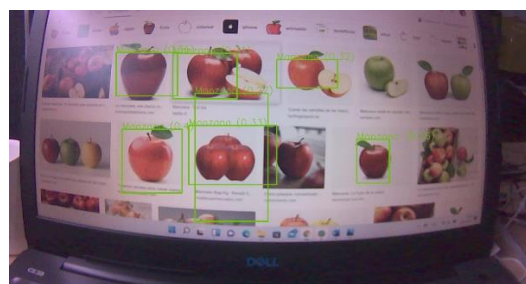
En la Figura 92 se pueden observar las detecciones realizadas con el modelo entrenado.

Figura 92

Detección de frutas



A)



B)

Nota. Utilizando los modelos entrenados se realizó la detección de a) pera (ssd-mobilenet-v2), b) manzana (YOLOv5).

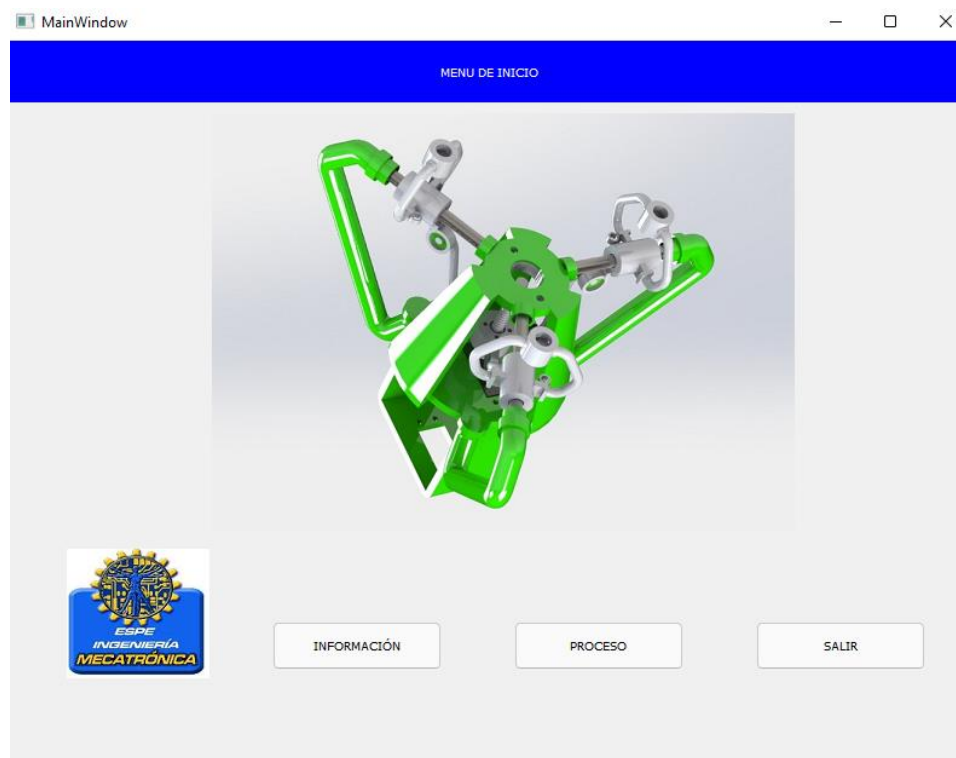
El algoritmo utilizado recibe una imagen y retorna el nombre del objeto identificado, el porcentaje de precisión del objeto identificado y las posiciones de los puntos para realizar los cuadros delimitadores. Para la acción de control solo se utilizará el nombre del objeto identificado.

Desarrollo de los Sistemas TICs

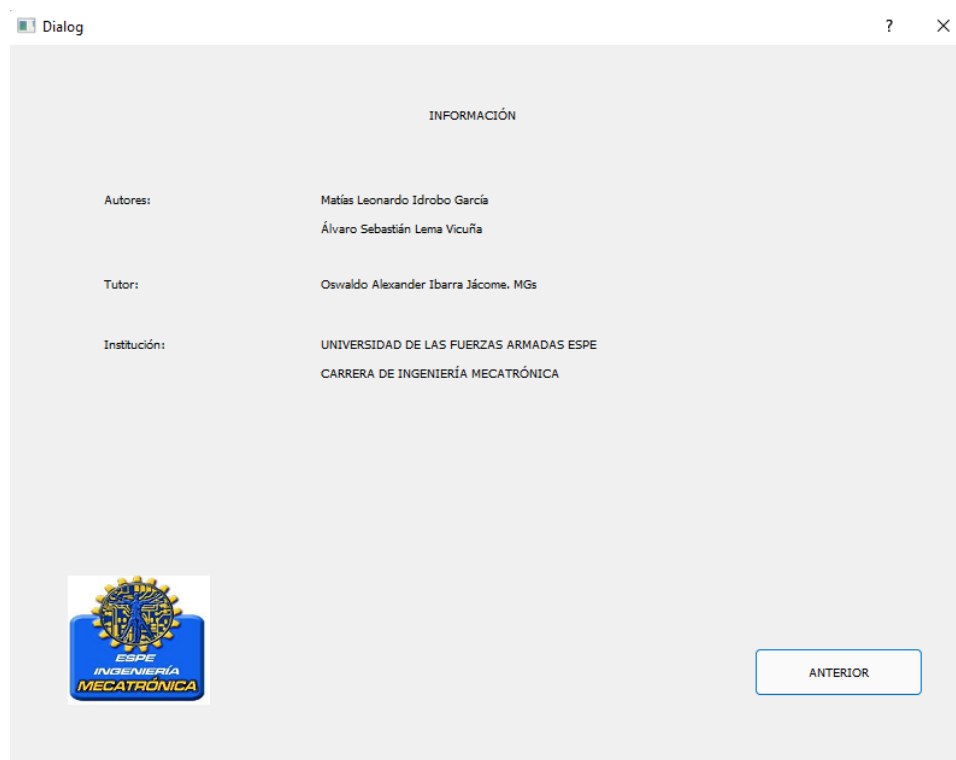
El subsistema TIC busca responder a las necesidades de ser un sistema intuitivo para el usuario y fácil de usar. Para ello se busca diseñar una interfaz HMI que permita la visualización y manipulación del actuador blando y una arquitectura modular entre los diferentes subsistemas.

Desarrollo de la Interfaz Humano Máquina (HMI)

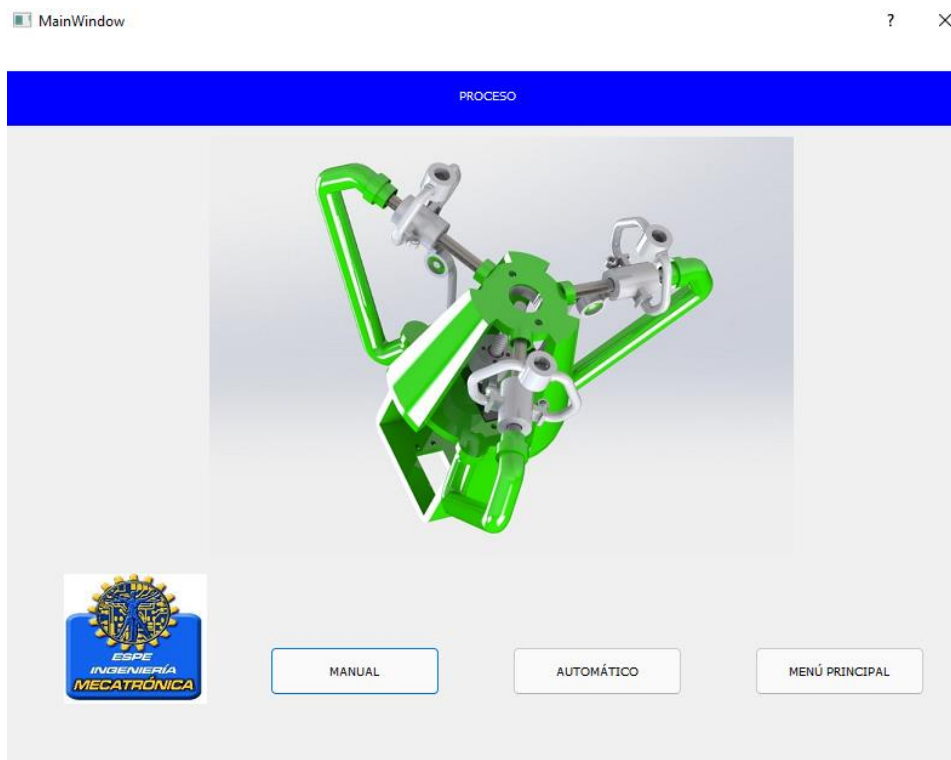
La interfaz HMI se encuentra compuesta por una ventana principal y dos ventanas secundarias. La ventana principal se observa en la Figura 93 en donde da la opción de abrir la Ventana de Información, abrir la Ventana para iniciar el proceso y la opción de salir del programa.

Figura 93*Ventana Principal*

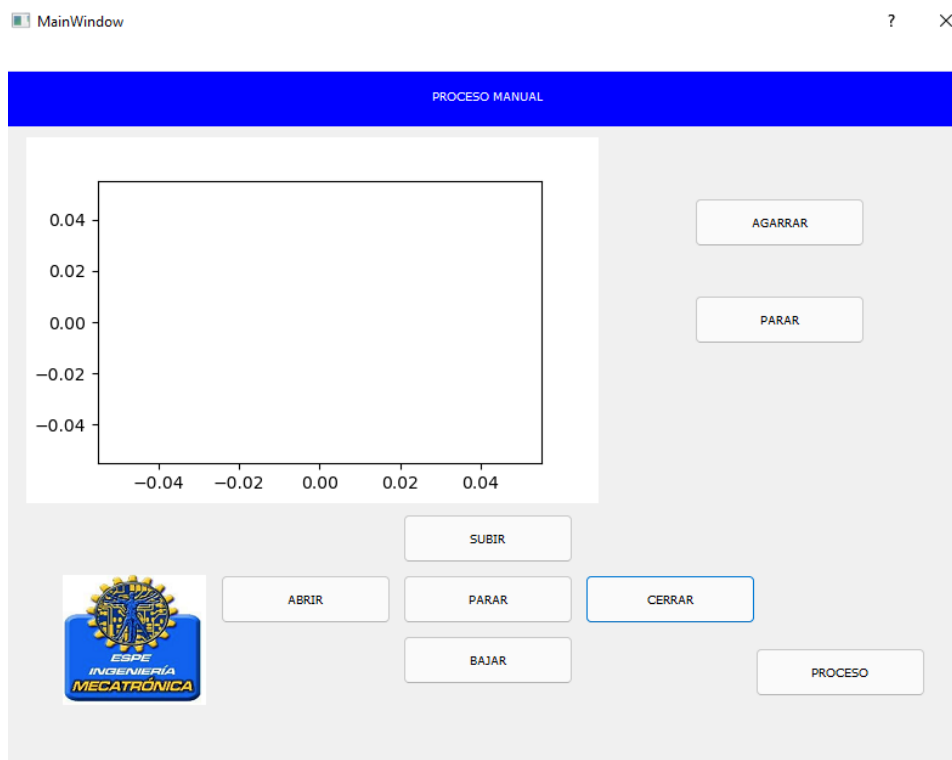
La ventana secundaria "Información" se muestra en la Figura #. En dicha ventana se muestra información del proyecto como lo es el nombre y autores.

Figura 94*Ventana Información*

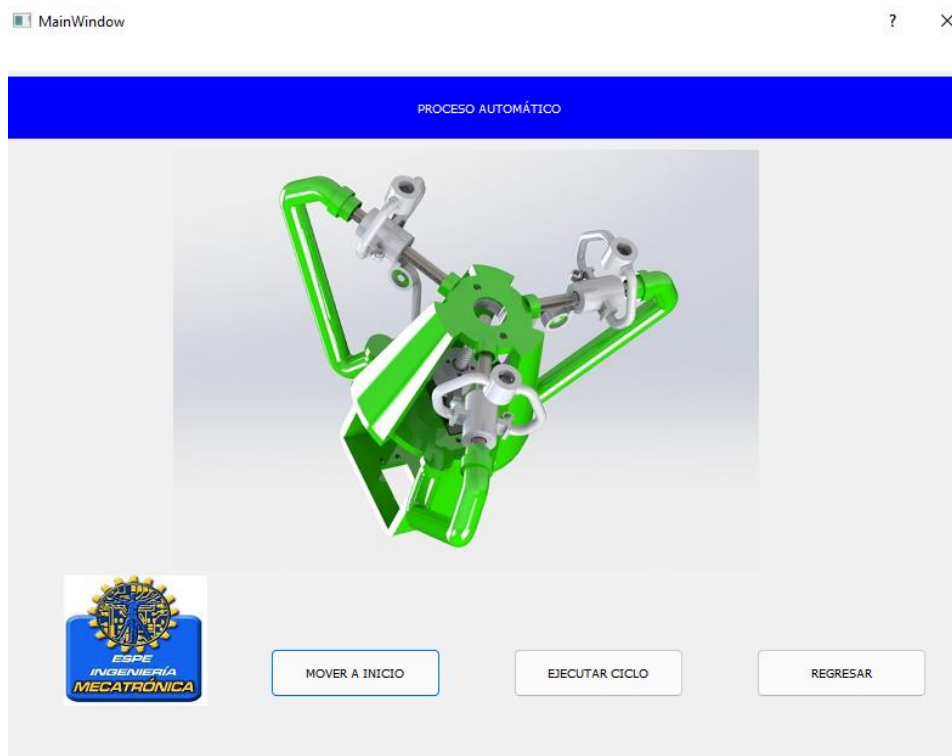
La ventana secundaria “Proceso”, presentada en la Figura 95, posee 3 botones. El botón de “Manual” abre una ventana que permitirá controlar los diferentes actuadores de manera manual al presionar diferentes botones. El botón de “Automático” permitirá que la muñeca realice un ciclo de agarre. Finalmente, el botón de “Menú Principal” cerrará la ventana y abrirá la ventana de “Menu de Inicio”.

Figura 95*Ventana Proceso*

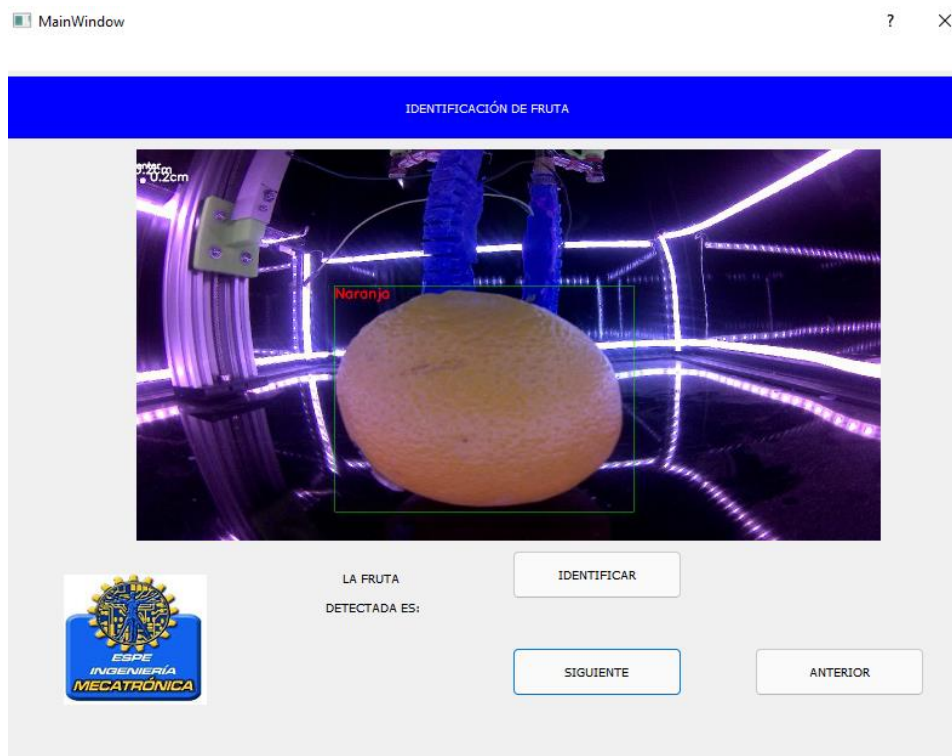
La ventana de “Proceso Manual”, presentada en la Figura 96, permitirá realizar el control de los actuadores de manera manual. Los botones de “Abrir” y “Cerrar” controlan el sentido de rotación del motor a pasos para realizar una acción de cierre y apertura de la muñeca. Los botones “Subir” y “Bajar” controlan el sentido de rotación del Servo Motor de Rotación Continua para realizar la acción de subida y bajada de la muñeca. El botón de “Parar” permite detener el movimiento del Servo Motor. El botón de “Agarrar” empezará la acción de Control permitiendo realizar el agarre. A su vez, comenzará a tomar datos del sensor de presión y los graficará. El botón de “Parar” detendrá la acción de agarre y dejará de tomar los datos del sensor. Finalmente, el botón de “Proceso” regresará a la ventana anterior.

Figura 96*Ventana Proceso Manual*

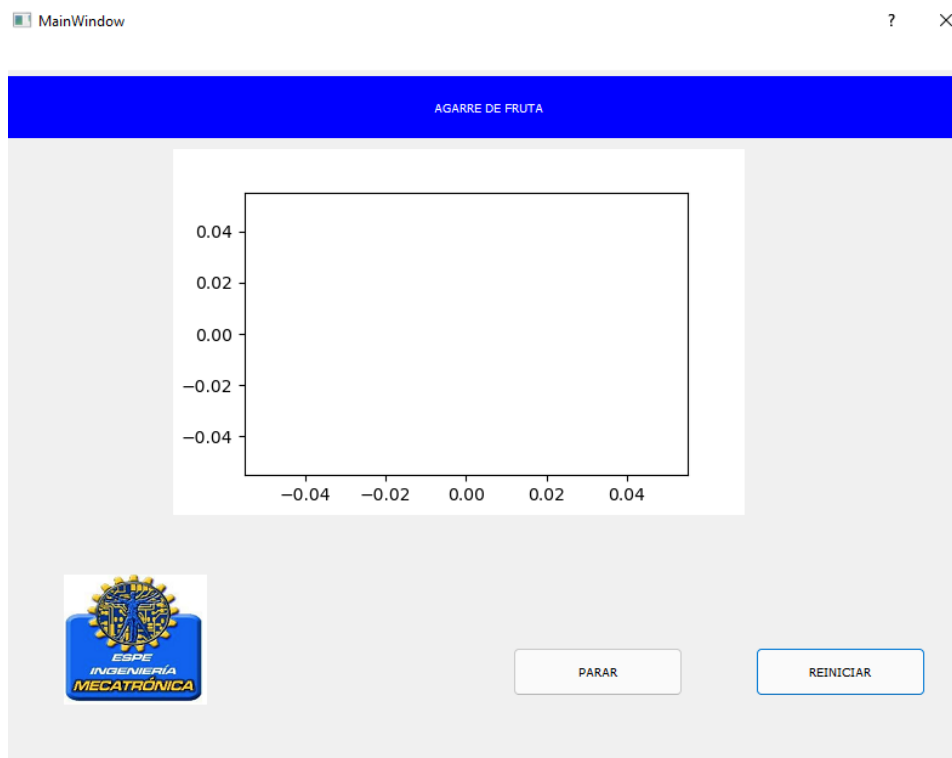
La ventana de “Proceso Automático”, presentada en la Figura 97, será el inicio para que la muñeca realice un ciclo de agarre. Esta ventana consta de 3 botones. El botón de “Mover a Inicio” enviará a la muñeca a su posición de inicio o “home”. El botón de “Ejecutar Ciclo” abrirá la ventana de “Identificación de Fruta”. Finalmente, el botón de “Regresar” permitirá volver a la ventana anterior.

Figura 97*Ventana Proceso Automático*

La ventana de “Identificación de Fruta”, presentada en la Figura 98, será el principio para realizar el ciclo de agarre de la muñeca. Esta ventana consta de 3 botones. El botón de “Identificar” indicará la fruta detectada de la Jetson Nano en ese instante y lo escribirá dentro de la HMI. El botón de “Siguiente” comenzará a realizar el ciclo de agarre de la muñeca. Finalmente, el botón de “Anterior” permitirá volver a la ventana anterior.

Figura 98*Ventana Identificación de Fruta*

La ventana de “Agarre de Fruta”, presentada en la Figura 99, comenzará el ciclo de agarre de la muñeca. A su vez comenzará a graficar los valores de presión entregados por el sensor para observar que se realice la acción de control de manera correcta. Finalmente, el botón de “Reiniciar” permitirá reiniciar el ciclo de agarre de la muñeca y regresará a la Ventana de “Proceso Automático”.

Figura 99*Ventana Agarre de Fruta*

Desarrollo de Red de controladores

Para poder comunicar los algoritmos de visión artificial junto al control clásico, los actuadores y sensores se utilizó una red híbrida basada en comunicación Serial y comunicación TCP/IP Wireless que permitió la transmisión de datos entre la GPU Jetson Nano y el micro controlador Arduino Nano mediante la interface desarrollada. La topología de red implementada es tipo estrella ubicando en el centro la computadora con la interface diseñada.

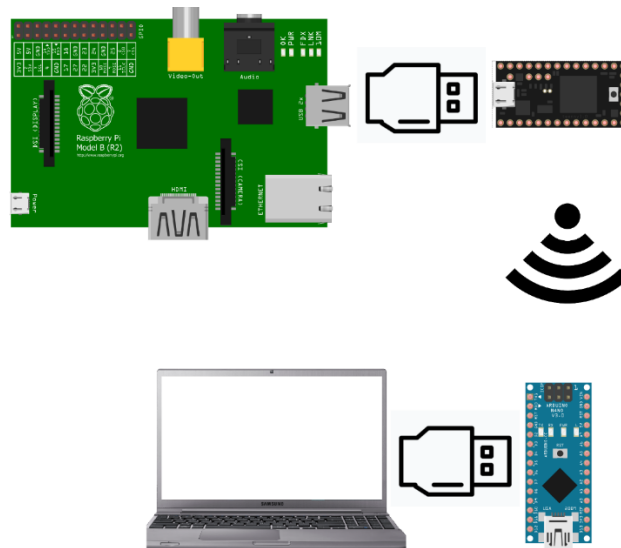
Esta red comunica a través de protocolo Serial a la Jetson Nano con un microcontrolador dedicado a comunicación Wireless ESP 8266 el protocolo utilizado se denomina UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) que básicamente

realiza el nexo de manera asíncrona, posterior a esta conexión el módulo ESP 8266 procesa la información recibida desde la Jetson Nano y la trasmite a través de Wi-Fi al ordenador donde se ejecuta la interface de usuario para esto utiliza el protocolo TCP/IP requiriendo la configuración de una red WAN.

En la interface se recibe los datos del tipo de fruta que se identifica y este dato se presenta y luego se envía al microcontrolador para que pueda ejecutar un ciclo de prueba y el control de presión para el agarre. Este dato se envía mediante comunicación serial desde la computadora además de las señales para controlar los motores.

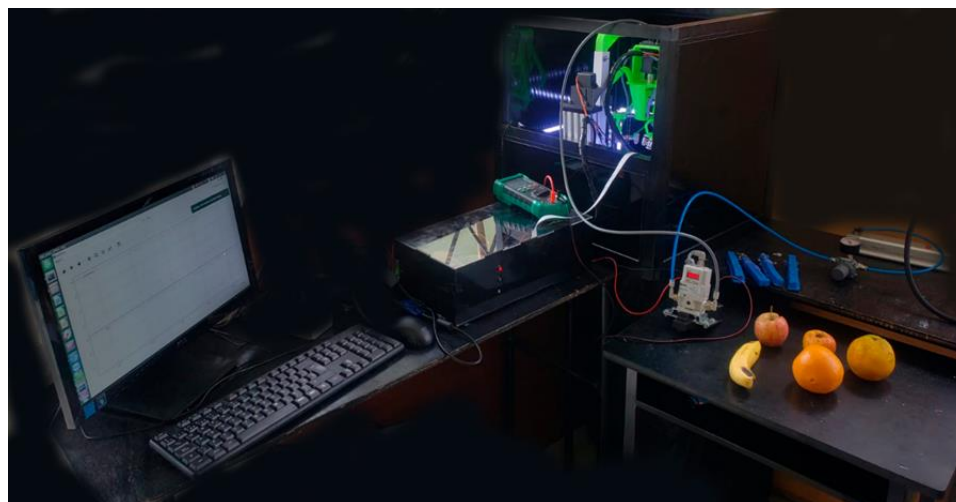
Figura 100

Topología de la Red de Comunicaciones



Integración final del sistema

En la Figura 101 se puede observar el sistema completo con sus diferentes subsistemas conectados.

Figura 101*Sistema Final*

Capítulo IV

Pruebas y Análisis de Resultados

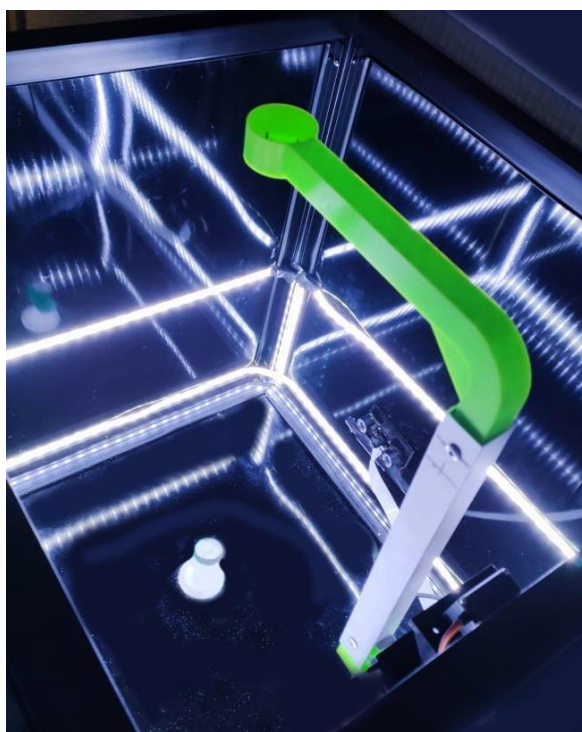
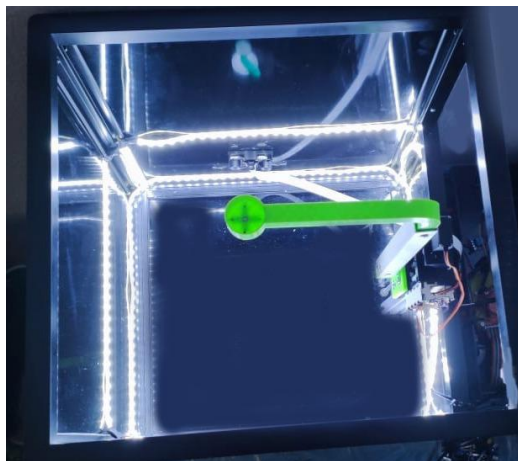
Una vez se obtuvo un sistema integrado con un prototipo estable y un banco de pruebas que permita minimizar la influencia de parámetros externos como luz, viento, calor, humedad, en el actuador final se procedió a realizar diferentes pruebas para conocer el funcionamiento del prototipo a diferentes condiciones.

Entorno de pruebas

Se diseñó un entorno de pruebas donde poder realizar las mismas con la seguridad de que los parámetros externos tengan menor influencia sobre el algoritmo de visión artificial y poder obtener datos para establecer los resultados de cada módulo a evaluar. El entorno de pruebas es una caja de acrílico de color negro la cuál está recubierta en su interior por tiras de luces LED.

Este entorno de pruebas nos permite manipular el actuador de manera segura, así los movimientos del actuador son realizados por un tornillo de potencia que ha sido acoplado con un servo motor de rotación continua y al cual se ancla el actuador con su acople respectivo como se muestra en la

Figura 102. Además, se colocó la cámara, que realiza la identificación mediante visión artificial, en una posición fija.

Figura 102*Entorno de pruebas*

Pruebas y Análisis de Resultados de Visión Artificial: FPS

La prueba de FPS (cuadros por segundos) permitirá determinar cuántos FPS puede analizar los modelos propuestos dentro de la Jetson Nano y así saber si pueden trabajar en aplicaciones de tiempo real.

El valor de los FPS va a ser obtenido mediante los mismos programas utilizados para la detección con los modelos, por medio de programación y utilizando la librería time.

En la Tabla 45 se pueden observar los FPS obtenidos para cada modelo.

Tabla 45

FPS para los modelos propuestos

| | YOLO | SSD MobileNet |
|-----|------|---------------|
| FPS | 11 | 35 |

SSD Mobilenet tiene una mayor cantidad de FPS que YOLO. Esto significa que el primer modelo tiene una mayor velocidad de análisis para la implementación en tiempo real.

Pruebas y Análisis de Resultados de Visión Artificial: mAP

El mAP (mean Average Precision) es una de las métricas más importantes para determinar la precisión que tiene un modelo entrenado para la detección de objetos. De manera simple, el mAP es obtenido al calcular el área bajo la curva de una gráfica de Precisión (calidad del modelo) vs Exhaustividad (cantidad de objetos que el modelo

identifica) y es un valor entre 0 a 1. Este valor es entregado al finalizar el entrenamiento de un modelo.

En la Tabla 46 se puede observar el valor del mAP para cada uno de los modelos entrenados.

Tabla 46

mAP para los modelos propuestos

| | YOLO | SSD MobileNet |
|-----|------|---------------|
| mAP | 0.98 | 0.675 |

YOLO tiene un mayor valor en su mAP que SSD Mobilenet. Esto significa que YOLO va a ser un modelo mucho más preciso que SSD Mobilenet.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos con los FPS y el mAP se ha decidido utilizar a YOLO como el modelo de detección de objetos a ser utilizado para el prototipo. A pesar de que los FPS de YOLO sean inferiores, esto se traduce en un retraso de aproximadamente un segundo en una transmisión en vivo, valor que se ha considerado adecuado con tal de tener un mayor porcentaje de detección, aunque se debió adaptar el tiempo de respuesta para esperar el segundo de retraso en el movimiento.

Pruebas y Análisis de Resultados de Visión Artificial: Identificación de Objetos en el Entorno de Pruebas

Las pruebas de visión artificial se realizaron mediante un DOE (Diseño de Experimento) de Taguchi que nos permite realizar menos pruebas con una correlación

muy alta para evaluar la incidencia, de varios factores con sus respectivos niveles, en la detección de tres diferentes frutas para las cuales se realizaran las pruebas restantes. Esta prueba permitirá conocer el rendimiento de YOLO dentro del entorno de pruebas al comparar el porcentaje general obtenido dentro de este, con el mAP del modelo.

Se utilizó un diseño de Taguchi de tres factores y tres niveles escogiéndose el modelo L9 de nueve variaciones.

Los factores seleccionados fueron el Eje X, Eje Y y Vista de la Fruta dentro del entorno de pruebas. Por otra parte, los niveles para cada uno de los factores corresponden a localizaciones previamente definidas en puntos dentro del entorno de pruebas. En la Tabla 47 se muestran los niveles junto a cada uno de los factores, junto a las siglas que van a utilizar dentro de la tabla de resultados.

Tabla 47

Factores y Niveles para Taguchi

| FACTOR | NIVELES |
|-------------|---------------|
| Eje X | F (FRENTE) |
| | M (MEDIO) |
| | P (POSTERIOR) |
| Eje y | I (IZQUIERDA) |
| | C (CENTRO) |
| | D (DERECHA) |
| Vista Fruta | 1 (LATERAL) |
| | 2(SUPERIOR) |
| | 3(INFERIOR) |

En la

Tabla 48 se pueden observar los resultados obtenidos para las Manzanas, Peras y Granadillas, utilizando el modelo de Taguchi previamente mencionado.

Tabla 48

Resultados de % de Detección en modelo de Taguchi L9

| Fruta | Nro | Eje x | Eje y | Vista Fruta | % de Detección |
|------------|---------------------|-------|-------|-------------|----------------|
| Manzana | 1 | F | D | 1 | 77 |
| | 2 | F | C | 2 | 76 |
| | 3 | F | I | 3 | 70 |
| | 4 | M | D | 2 | 84 |
| | 5 | M | C | 3 | 78 |
| | 6 | M | I | 1 | 87 |
| | 7 | P | D | 3 | 85 |
| | 8 | P | C | 1 | 85 |
| | 9 | P | I | 2 | 84 |
| | Promedio en Manzana | | | | |
| Pera | 1 | F | D | 1 | 84 |
| | 2 | F | C | 2 | 61 |
| | 3 | F | I | 3 | 70 |
| | 4 | M | D | 2 | 60 |
| | 5 | M | C | 3 | 62 |
| | 6 | M | I | 1 | 84 |
| | 7 | P | D | 3 | 65 |
| | 8 | P | C | 1 | 84 |
| | 9 | P | I | 2 | 60 |
| | Promedio en Pera | | | | |
| Granadilla | 1 | F | D | 1 | 87 |

| Fruta | Nro | Eje x | Eje y | Vista Fruta | % de Detección |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------------|----------------|
| | 2 | F | C | 2 | 90 |
| | 3 | F | I | 3 | 88 |
| | 4 | M | D | 2 | 94 |
| | 5 | M | C | 3 | 85 |
| | 6 | M | I | 1 | 86 |
| | 7 | P | D | 3 | 85 |
| | 8 | P | C | 1 | 91 |
| | 9 | P | I | 2 | 83 |
| | Promedio en Granadilla | | | | 87.67 |
| | PROMEDIO GENERAL | | | | 79.44 |

Los resultados de Taguchi indican que se obtuvo un porcentaje general de 79.44% de detección dentro del entorno de pruebas. La manzana obtuvo un porcentaje de 80.67%, la pera 70% y la granadilla 87.67%.

Se procede a calcular el rendimiento utilizando la fórmula dentro de la Ecuación 18, obteniéndose el siguiente resultado.

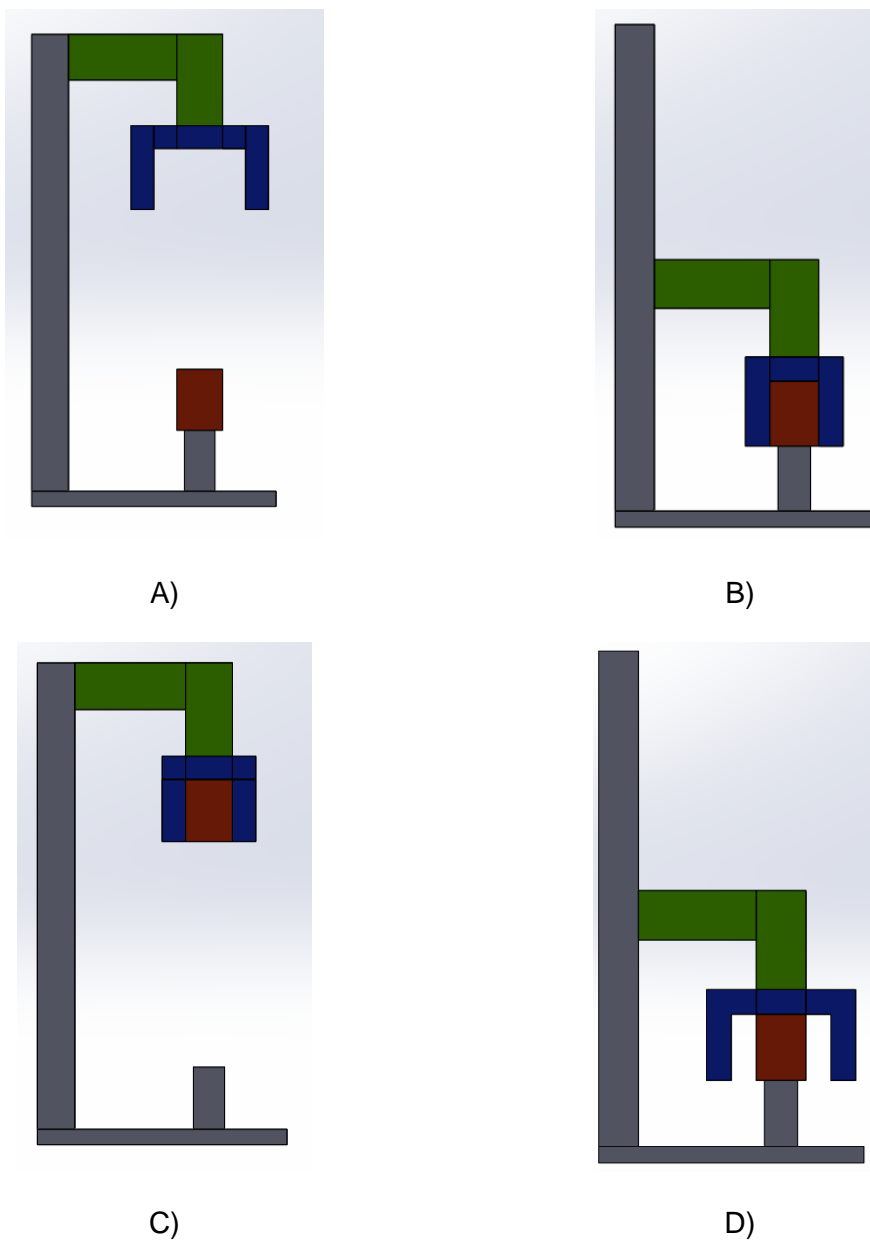
$$Rendimiento = \frac{79.44}{98} = 81.06 \quad (18)$$

La detección dentro del entorno de pruebas tiene un rendimiento de 81.06%.

Pruebas y Análisis de Resultados del Agarre: Presión Óptima

Para el agarre óptimo se requería encontrar la presión adecuada para cada fruta, que permite levantar y luego asir la fruta para poder realizar un ciclo de prueba. Se definió como Ciclo de Prueba a elevar la fruta 15 cm y posteriormente descender al punto de partida. Esto con el fin de comprobar un agarre afianzado y estable. En la

Figura 103 se observa de manera gráfica el ciclo de prueba a cumplirse.

Figura 103*Ciclo de Pruebas*

Nota: La imagen es referencial. A) La muñeca es elevada hasta la posición HOME. B) La muñeca desciende una distancia previamente definida hasta posicionarse sobre la

fruta y realizar el agarre, además de empezar la acción de control. C) La fruta es elevada junto a la muñeca. D) La muñeca desciende nuevamente junto a la fruta y la deposita en su posición.

Se realizaron pruebas con los tres tipos de frutas Manzana, Pera y Granadilla, obteniéndose los siguientes valores de Presión óptima mismos que fueron obtenidos por medio de la evaluación de resultados arrojada por los sensores de fuerza cuya precisión no fue eficiente para realizar un control en lazo cerrado con la fuerza como variable de control, pero proveyeron información suficiente para poder establecer un rango de presiones para cada fruta y luego establecer una presión única que subsane el proceso. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la medición de la fuerza a partir del modelo matemático presentado, así como gráficas detalladas del comportamiento de la fuerza resultante en función de presión suministrada. Los datos de masa de cada fruta fueron obtenidos de fuentes internacionales dedicadas a la estadística en alimentos.

Resultados de medición de la Fuerza Resultante en Función de la Presión

Aplicada al Sistema

En el capítulo 3 cuando se buscaba instrumentar el sistema para definir el sensor adecuado para generar el lazo de control se instalaron sensores de fuerza tipo FSR resistivos mismos que no proporcionaban una medición eficiente para incorporarlos al sistema de control, sin embargo, las mediciones de estos sensores fueron utilizadas para definir el comportamiento del modelo en cuanto a Fuerzas Resultantes en función de la presión suministrada. El modelo se especifica en la sección 0, específicamente en la **Figura 64** y **Figura 66** donde se muestra la dinámica del agarre óptimo dando como resultado la **Ecuación 18**.

$$FR = [(F1 + F2 + F3)\cos(\theta)] * (1 + \mu s.) \quad (19)$$

Se han obtenido los siguientes resultados en fuerzas aplicadas y Resultantes luego de realizar la réplica de 3 mediciones variando las presiones de entrada al sistema sobre cada fruta para obtener las gráficas siguientes.

Figura 104

Resultados medición fuerzas vs presión - PERA

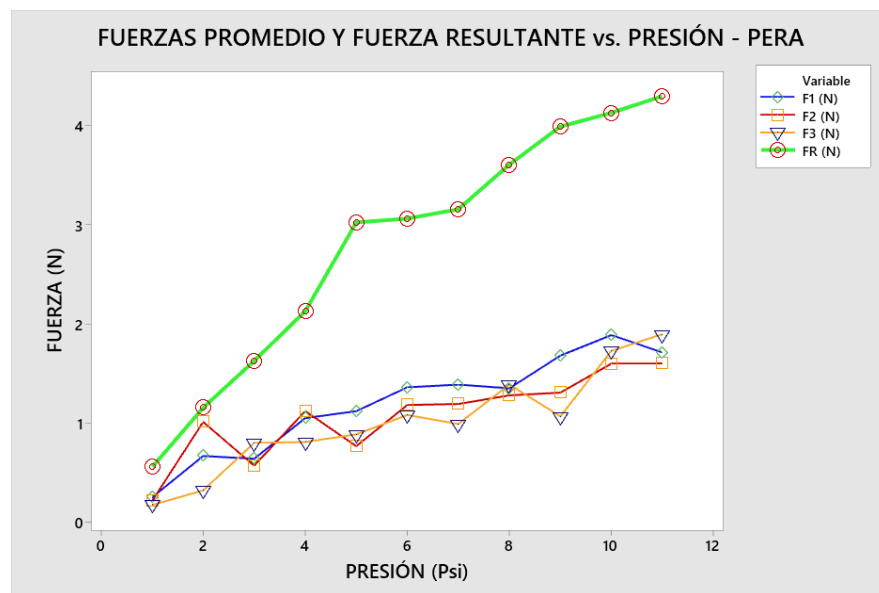
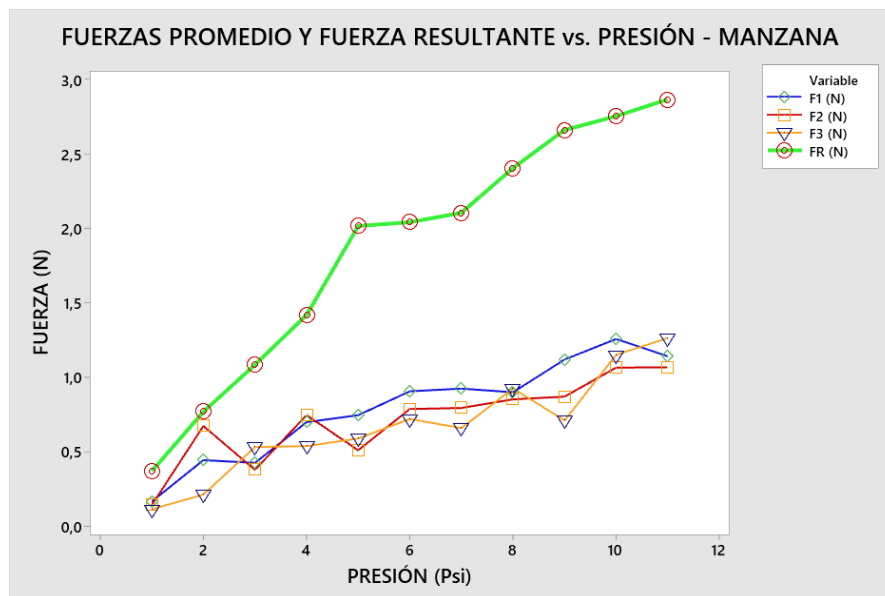
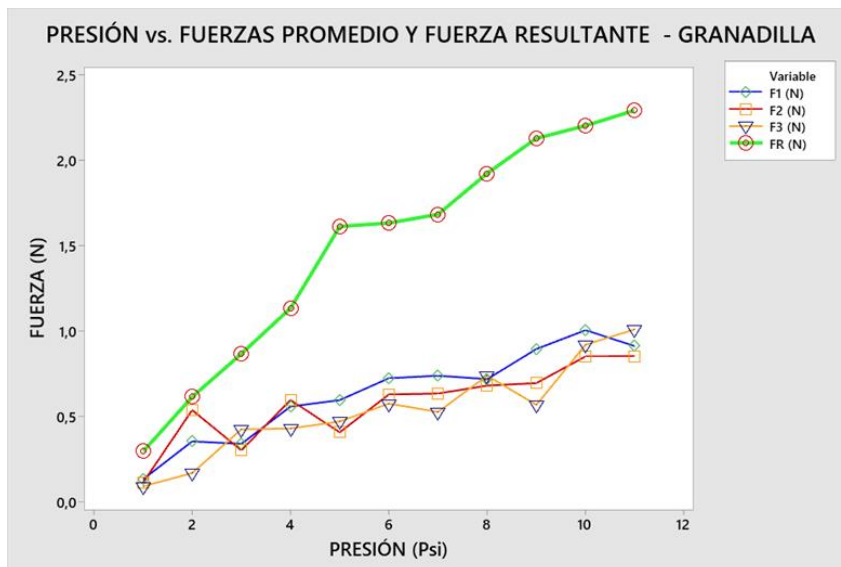


Figura 105

Resultados medición fuerzas vs presión - MANZANA

**Figura 106**

Resultados medición fuerzas vs presión sobre - GRANADILLA



De las gráficas mostradas se interpolaron valores de presión adecuada para generar la fuerza necesaria para realizar un agarre firme con posibilidad de cumplir el ciclo de prueba antes mencionado. Para ello se utilizaron valores de masa promedio de las diferentes frutas, obtenidos de la FDA (Food Data Central), como valor a obtener como resultante y poder calcular así la presión óptima de agarre.

Tabla 49

Presión para Agarre Óptimo

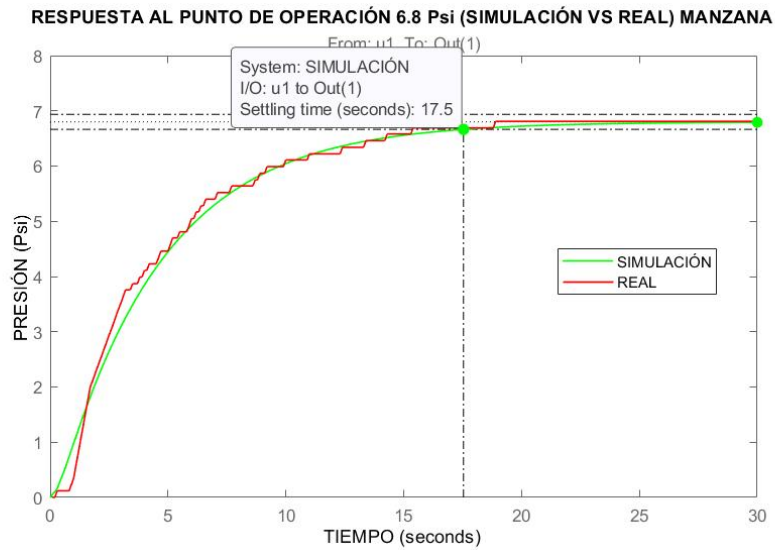
| FRUTA | PESO PROMEDIO FRUTAS DE PRUEBA(N) | PRESIÓN OPTIMA (Psi) |
|------------|-----------------------------------|----------------------|
| Manzana | 1,92 | 6,8 |
| Pera | 3,00 | 7,2 |
| Granadilla | 1,55 | 7 |

Pruebas y Análisis de Resultados del Control

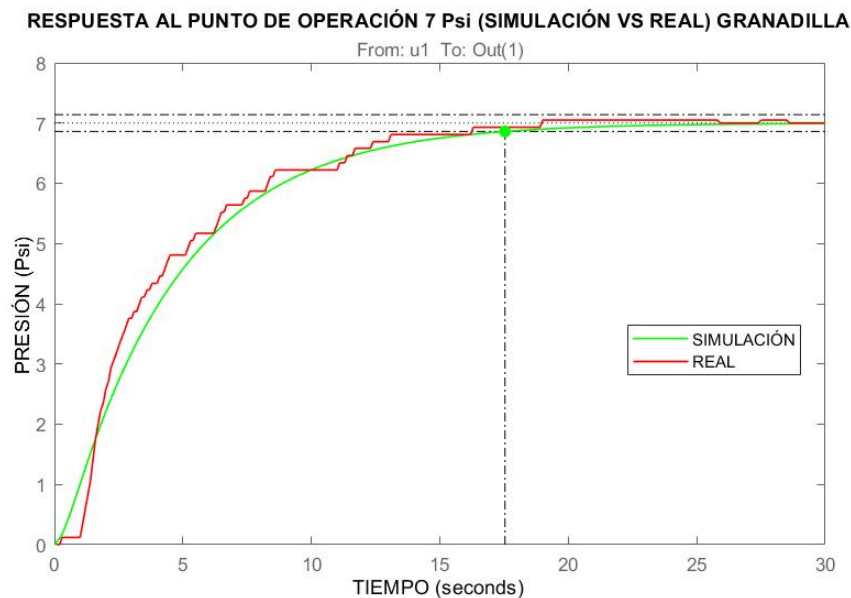
Se realizaron pruebas para el control con presión óptima para cada fruta. Obteniendo los siguientes resultados.

Figura 107

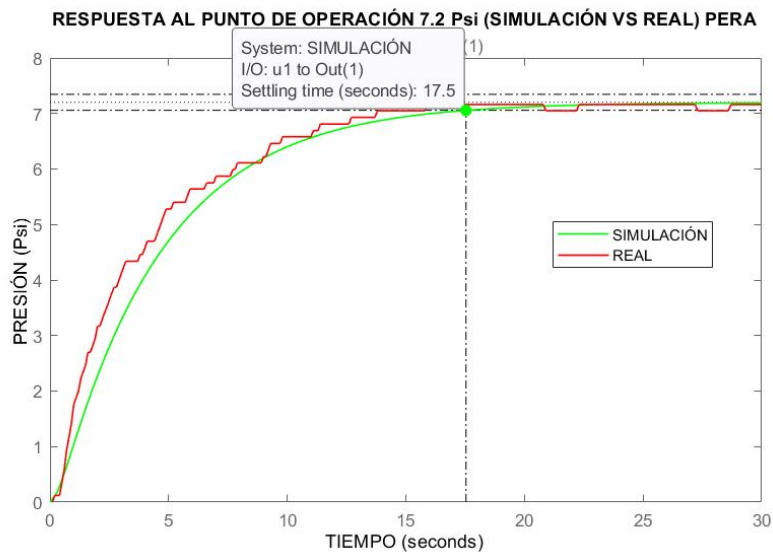
Gráfica de respuesta al punto de operación 6,8 Psi de simulación vs real (MANZANA).

**Figura 108**

Gráfica de respuesta al punto de operación 7 Psi de simulación vs real (GRANADILLA).

**Figura 109**

Gráfica de respuesta al punto de operación 7.2 Psi de simulación vs real (PERA).



En la Tabla 50 se observa el desempeño del controlador frente a diferentes parámetros.

Tabla 50

Desempeño del Controlador

| Parámetro | Símbolo | Esperado | Diseño | Aplicado |
|---------------------------|---------|----------|--------|----------|
| Tiempo de Establecimiento | Ts | <2.5 s | 17.5 s | 19 |
| Sobre impulso | Mp | < 5% | 0% | 0% |
| Error estado estable | E | < 2% | 0% | 1% |

El desempeño del controlador PI aplicado al sistema ha respondido de manera robusta proveyendo estabilidad, y precisión al control de presión. Esta respuesta ha permitido que el agarre se realice de manera fija y con una respuesta inmediata a las perturbaciones de posicionamiento del objeto.

En cuanto al tiempo de establecimiento se tiene un excedente de 2 s. mismo que no es relevante en el accionar del producto debido a que el agarre se establece en 25 segundos máximo por fruta con el fin de optimizar el proceso.

En cuanto al error se encuentra un error real de 1% que no afecta directamente en el proceso siendo una precisión excelente y que se puede mantener ante cualquier perturbación propia del proceso de agarre.

Pruebas y Análisis de Resultados del Agarre: Repetibilidad en Ciclos de Prueba

Para el cálculo del porcentaje de repetibilidad se utilizará una apreciación cualitativa del agarre cuando se cumpla un ciclo de prueba. Se realizaron 3 series de pruebas con los mismos parámetros de agarre tanto en presión como en ubicación del actuador obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 51

Tabla de resultados de Ciclos de Pruebas de Agarre

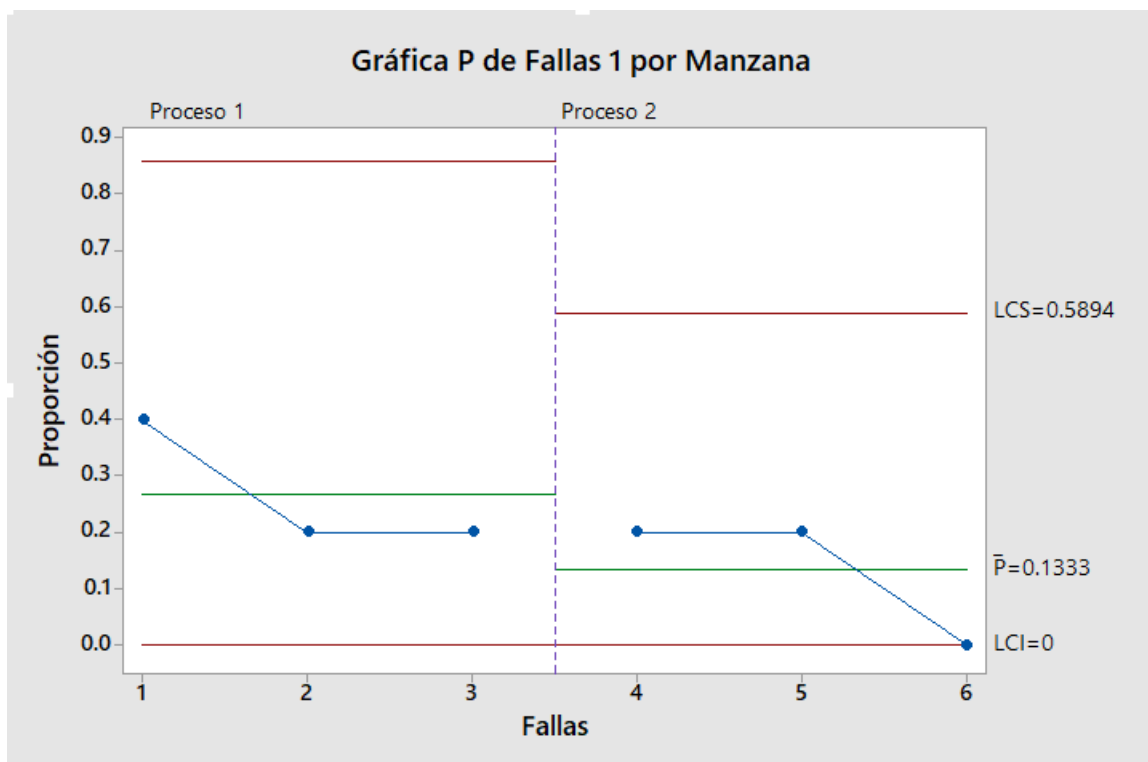
| Fruta | Serie | # Prueba | Ciclo de Prueba Cumplido |
|---------|-------|----------|--------------------------|
| MANZANA | 1 | 1 | NO |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |
| | 2 | 1 | SI |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | NO |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |

| Fruta | Serie | # Prueba | Ciclo de Prueba Cumplido |
|------------|-------|----------|-----------------------------|
| | 3 | 1 | SI |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |
| PERA | 1 | 1 | SI |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | NO |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | NO |
| | 2 | 1 | SI |
| | | 2 | NO |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |
| | 3 | 1 | SI |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |
| GRANADILLA | 1 | 1 | SI |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |
| | 2 | 1 | SI |
| | | 2 | SI |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |
| | 3 | 1 | SI |

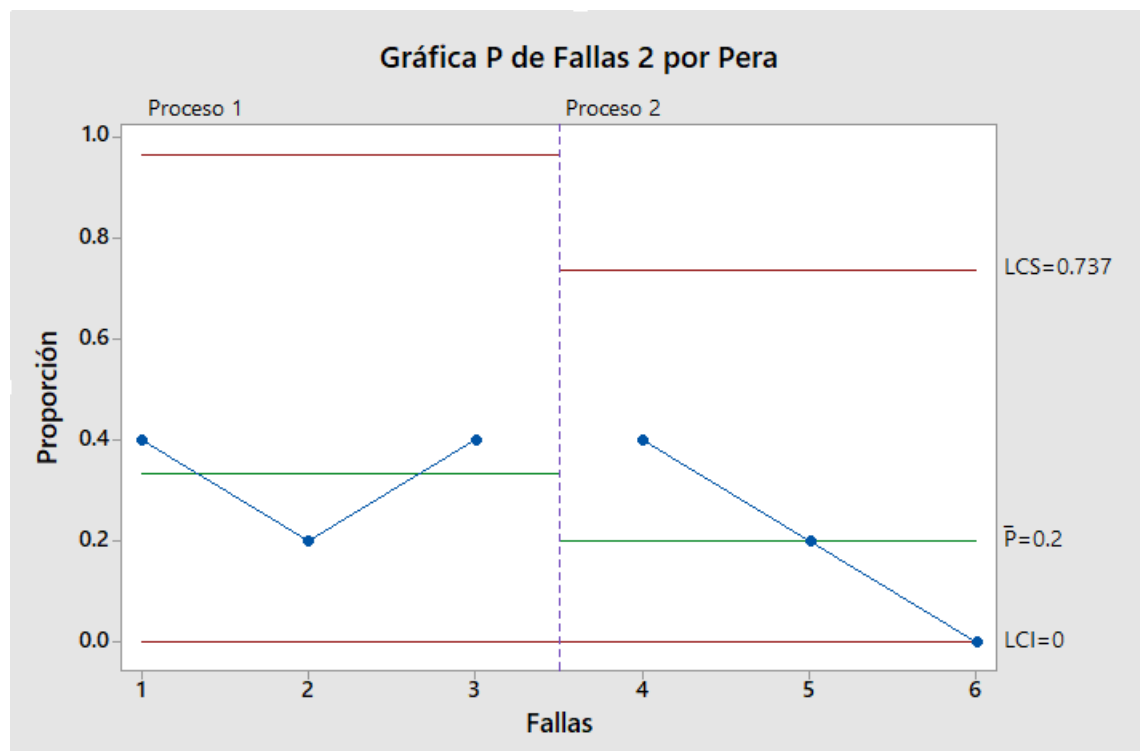
| Fruta | Serie | # Prueba | Ciclo de Prueba Cumplido |
|-------|-------|----------|--------------------------|
| | | 2 | SI |
| | | 3 | SI |
| | | 4 | SI |
| | | 5 | SI |

Debido a que el prototipo diseñado es el resultado de varios cambios, tanto a nivel de algoritmos, como de estructuras mecánicas, se ha considerado utilizar Gráficas de Control P con etapas. Este tipo de gráficas permite determinar el porcentaje de elementos defectuosos (en este caso ciclos) en un grupo de muestras, además de compararla de manera gráfica con el mismo proceso, pero a diferentes condiciones (en este caso condiciones de rediseño). En las gráficas a continuación el Proceso 1 se refiere a los ciclos de pruebas antes de realizar el rediseño, mientras que el Proceso 2 se refiere a los ciclos de prueba después de realizar el rediseño.

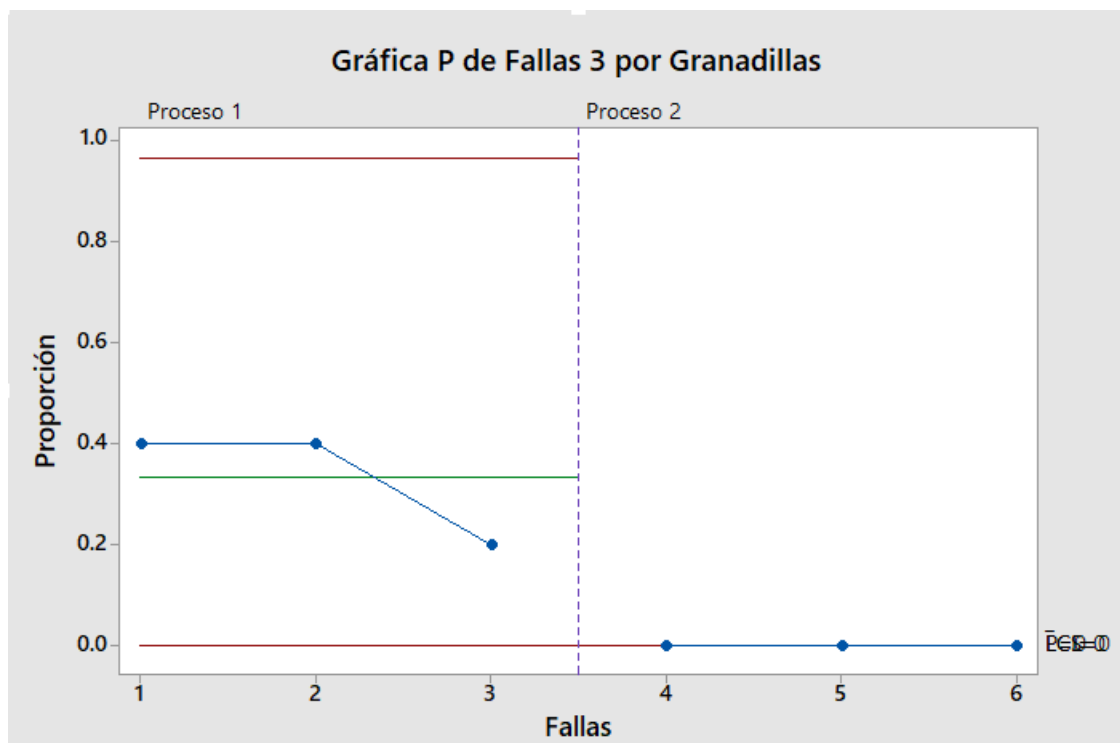
En la Figura 110 se observa la Gráfica de Control P con etapas realizado para las manzanas.

Figura 110*Gráficas P para Manzanas*

En la Figura 111 se observa la Gráfica de Control P con etapas realizado para las peras.

Figura 111*Gráficas P para Peras*

En la Figura 112 se observa la Gráfica de Control P con etapas realizado para las manzanas.

Figura 112*Gráficas P para Granadillas*

Las gráficas muestran que existe una mejora entre el Proceso 1 y el Proceso 2. Esta mejoría se debe al trabajo de rediseño realizado a lo largo de la construcción del prototipo.

Luego de obtener los datos de prueba se utiliza el criterio de establecimiento de repetibilidad cualitativa para obtener un porcentaje de cumplimiento de ciclo de prueba, individual para las frutas y luego general para cualquiera de las 3 estudiadas.

Tabla 52

Promedio de Agarres óptimos y Repetibilidad General

| FRUTA | PROMEDIO DE CICLOS CUMPLIDOS | PORCENTAJE DE REPETIBILIDAD GENERAL |
|-------------------|-------------------------------------|--|
| Manzana | 86.67 | 88.89 |
| Pera | 80 | |
| Granadilla | 100 | |

El sistema tiene un porcentaje de repetibilidad del 88.89%, haciendo un hincapié en la granadilla, la cual tuvo un promedio de repetibilidad del 100%, lo que significa que cumplió con todos los ciclos propuestos.

Capítulo V

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

Conclusiones

Se diseñaron actuadores blandos utilizando como material base al caucho de silicona Mold Star 30. Estos actuadores blandos tienen un total de 7 cámaras de aire. Además, gracias a los resultados del análisis CAE estos elementos están diseñados para poder soportar una tensión máxima teórica de Von-Mises 631 KPa, trabajando con una presión de 8.70 Psi, valor con el cuál alcanza una deformación máxima.

Por medio del constante rediseño del prototipo, además de las mejoras en los diferentes algoritmos, se logró reducir los errores de medición además de mejorar los resultados de agarre. Por una parte, se implementó un filtro digital para reducir la cantidad de ruido electrónico mejorando significativamente la estabilidad en la medición mediante el sensor de presión. Se definió una longitud de 62 mm para los actuadores blandos, valor adecuado para realizar el agarre de frutas, además de diseñar acoples impresos en 3D para evitar la fuga de aire, y, por lo tanto, presión. Estas condiciones permitieron que el prototipo pueda cumplir su ciclo de agarre con porcentajes de repetibilidad para la manzana de 86.67%, para la pera de 80% y para la granadilla del 100%, dando una repetibilidad general para el sistema de 88.89%.

La detección de frutas es realizada por medio de un sistema de visión artificial, utilizando a la red neuronal YOLO, junto a un dataset en el que se encuentran fotos de manzanas, peras y granadillas, con los cuales se diseñó un modelo con las frutas antes mencionadas. Dicho modelo tiene un mAP de 0.98 y trabaja a 11 FPS. Se optó a usar este modelo debido a su alto valor de mAP, además de que los 11 FPS se traducen en un segundo de retraso, valor adecuado para aplicaciones en tiempo real. El

modelo entrenado tiene un porcentaje de rendimiento del 81.06% dentro del entorno de pruebas para realizar la detección de objetos.

Se implementó un sistema de control clásico, para lo cual se evaluaron 3 opciones para la instrumentación de los actuadores blandos para poder establecer el lazo de control, este proceso arrojó resultados favorables con el sensor de presión diferencial y se aplicó un lazo de control de presión con la variable manipulada corriente a través de un circuito de control mediante ancho de pulso de señales de corriente que junto a un válvula de control de presión diferencial comprenden un ciclo estable que provee a los actuadores de una presión precisa además de ejercer un agarre de manera controlada evitando que se deterioren los actuadores blandos. Se diseñó un controlador PI y se implementó mediante técnicas digitales de control en un microcontrolador. Los resultados de la implementación del mencionado sistema de control son contundentes y robustos permitiendo como se muestra obtener un error en estado estable de menos del 1% y un sobreimpulso nulo en la presión mismo que es importante para no dañar la superficie de las frutas, en cuanto al tiempo de establecimiento se acordó un tiempo menor a los 25s y se cumple con este parámetro al tener un tiempo de establecimiento de 17.5 segundos.

Estas características del control aplicado proveen al sistema la capacidad de realizar un agarre óptimo, confiable y sobre todo preciso desde el punto de vista de la presión y consecuentemente fuerza suministrada al sistema.

Recomendaciones

Para poder mejorar el porcentaje de detección en el entorno de pruebas, se recomienda tomar fotos de todos los ángulos, posiciones y variaciones de luz de los objetos a ser entrenados y realizar también fotografías desarrollando un diseño

experimental para identificar la incidencia de parámetros de adquisición de fotografías para conformar el data-set.

Se recomienda variar la metodología de evaluación de resultados para probar la tecnología de visión artificial y robótica blanda en aplicaciones diferentes como clasificación, manipulación de objetos delicados y asistencia robótica.

Se recomienda realizar un estudio de aplicación de control inteligente desarrollando redes neuronales que permitan administrar las múltiples variables del proceso y evaluar el rendimiento de las mismas en el agarre óptimo.

Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se plantea acoplar el sistema a un manipulador robótico que permita evaluar el desempeño del agarre y poder evaluarlo ante movimientos de 6 grados de libertad como los que provee un robot del tipo mencionado.

Aplicar la tecnología de robótica blanda mostrada en el presente proyecto para aplicaciones diferentes que requieran el tipo de agarre que proporciona el sistema y que necesiten del proceso de detección y clasificación como puede ser manipulación de herramientas o manipulación de instrumental médico.

Por medio de un algoritmo de visión artificial, detectar el diámetro exacto de la fruta a agarrar para poder realizar un agarre más preciso para cada fruta a ser recogida.

Entrenar un modelo de detección de madurez de frutas por medio de visión artificial para ser incorporado en el actuador blando.

Bibliografía

- Alves, J. (2017). *Bio-inspired robotic gripper with hydrogel-silicone soft skin and 3d printed endoskeleton*. Coímbra: ISR.
- Beijing Soft Robot Tech. (2019). *SRT*. Obtenido de SRT: <http://en.softrobottech.com>
- Build Baymax. (2014). *Build Baymax*. Obtenido de Build Baymax:
<https://www.cs.cmu.edu/~cga/build-baymax/#prettyPhoto>
- Canseco, J., & Conrado, C. (2020). *Diseño, construcción e implementación de un prototipo de robot omnidireccional para impresión 3D*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Matriz.
- CORPEI. (01 de ENERO de 2019). *CORPEI TU NEGOCIO AL MUNDO* . Obtenido de Frutas Exóticas Ecuatorianas En Mercados Internacionales:
<https://corpei.org/2019/01/02/frutas-exoticas-ecuatorianas-en-mercados-internacionales/#:~:text=Además%20del%20banano%2C%20Ecuador%20registr,a,%2C%20tomate%20de%20árbol%2C%20guanábana>.
- Gausemeier, J., Moehringer, & Stefan. (2003). *New Guideline VDI 2206 - A Flexible Procedure Model for the Desing of Mechatronic Systems*.
- Ingemecánica. (s.f.). *Ingemecánica*. Obtenido de Ingemecánica:
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html>
- Kathuria, A. (23 de Abril de 2018). *Towards Data Science*. Obtenido de Towards Data Science: <https://towardsdatascience.com/yolo-v3-object-detection-53fb7d3bfe6b>
- Khurshid, A. A., & Afzaal, M. (2011). *Robotic Grasping and Fine Manipulation Using Soft Fingertip*. *Advances in Mechatronics*, 155-174.

- Martínez, D. (10 de Junio de 2020). Agricultura 4.0: la robótica agrícola y el futuro de la agricultura. *Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera*, 36-39. Obtenido de Revista Agricultura:
http://www.revistaagricultura.com/robotica/innovacion/agricultura-40-la-robotica-agricola-y-el-futuro-de-la-agricultura_12060_121_15110_0_1_in.html
- Medina, J., & Vélez, P. (2014). "Soft Robotic": Una nueva generación de robots. *MASKANA, I+D+ingeniería*, 109-118.
- Mohamed, A., Shaw-Sutton, J., Green, B., Andrews, W., Roley-Parnell, E., Zhou, Y., . . . Stoelen, M. (2019). Soft manipulator robot for selective tomato harvesting. *Precision agriculture '19*, 799-805.
- Mosadegh, B., Polygerinos, P., Keplinger, C., Wennstedt, S., Shepherd, R. F., Gupta, U. S., . . . Whitesides, G. M. (2013). Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*, 2163-2170.
- Naranjo, X., & Tello, J. (2017). *Diseño e implementación de una pinza flexible basado en la tecnología de robótica blanda para manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular implementado en el brazo robótico Mitsubishi del laboratorio de mecatrónica*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.
- Nguyen Le, T. (2019). *Force Control for Soft Robotic Hands Applied to Grasping*. Tampere: Tampere University.
- Nguyen, T., Lundell, J., & Kyrki, V. (2019). Safe Grasping with a Force Controlled Soft Robotic Hand. *arXiv*.

- Polygerinos, P., Lyne, S., Wang, Z., Nicolini, L. F., Mosadegh, B., Whitesides, G. M., & Walsh, C. J. (2013). Towards a Soft Pneumatic Glove. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1512-1517.
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. <http://arxiv.org/abs/1506.02640>.
- Rosebrock, A. (2017). *Deep Learning for Computer Vision with Python*. PyImageSearch.
- Shanmugamani, R. (2018). *Deep Learning for Computer Vision: Expert techniques to train advanced neural networks using TensorFlow and Keras*. Packt.
- Shao, Q., Zhang, N., Shen, Z., & Gu, G. (2020). A Pneumatic Soft Gripper with Configurable Workspace and Self-sensing. *IEEE 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots*, 22-26.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Handbook of Robotics*. Springer.
- Singhal, M. (7 de Julio de 2020). *Medium*. Obtenido de Medium: <https://medium.com/@techmayank2000/object-detection-using-ssd-mobilenetv2-using-tensorflow-api-can-detect-any-single-class-from-31a31bbd0691>
- TBL Performance Plastics. (s.f.). *TBL Performance Plastics*. Obtenido de TBL Performance Plastics: <https://www.tbplastics.com/how-to-determine-tubing-burst-pressure-and-working-pressure/>
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo e productos*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Voulodimos, A., Doulamis, N., Doulamis, A., & Protopapadakis, E. (2018). Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review. *Hindawi*.

Wang, Z., Wu, Y., Yang, L., Thirunavukarasu, A., Evison, C., & Zhao, Y. (2021). Fast Personal Protective Equipment Detection for Real Construction Sites Using Deep Learning Approaches. *sensors*.