

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



---

**“DESARROLLO DE UN ROBOT CNC TIPO CARTESIANO  
DE LA MARCA FARMBOT COMO SOPORTE  
TECNOLÓGICO PARA EL PROCESO DE CONTROL DE  
CALIDAD DE PLANTINES”**

---

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN.**

**AUTOR:**

**Br. Carlos Jhonatan Choque Moscoso**

**ASESOR:**

**Ms. Ing. Filiberto Azabache Fernández.**

**Trujillo-Perú**

**2018**

**DESARROLLO DE UN ROBOT CNC TIPO CARTESIANO DE LA  
MARCA FARMBOT COMO SOPORTE TECNOLÓGICO PARA EL  
PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD DE PLANTINES**

**Elaborado por:**

---

Br. Carlos J. Choque Moscoso  
Tesisista

**Aprobado por:**

---

Ing. LUIS VARGAS DÍAZ  
PRESIDENTE  
CIP:104175

---

Ing. JORGE LUIS ALVA ALARCON  
SECRETARIO  
CIP:214251

---

Ing. LENIN HUMBERTO LLANOS LEON  
VOCAL  
CIP:139213

---

Ms. Ing. FILIBERTO AZABACHE FERNANDEZ  
ASESOR  
CIP:97916

## **PRESENTACIÓN**

Señores miembros del jurado:

De conformidad a lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, pongo a vuestra consideración el trabajo de Investigación Titulado: “DESARROLLO DE UN ROBOT CNC TIPO CARTESIANO DE LA MARCA FARMBOT COMO SOPORTE TECNOLÓGICO PARA EL PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD DE PLANTINES” a fin de ser evaluado.

Esperando que el presente trabajo cubra las expectativas que tienen al respecto, excusándome de antemano por los errores involuntarios incurridos en el desarrollo.

Trujillo, Noviembre de 2018

## **DEDICATORIA**

A mis padres.

A mi madre que a pesar de todo lo que vivimos, siempre se mantuvo en pie, luchó día a día para sacarme adelante y que sin ella nada de esto sería posible.

A mi padre que se encuentra en cielo, que es un pilar importante en mi vida, un modelo a seguir y que, a pesar de no estar a nuestro lado, nunca nos dejó de ayudar.

*Carlos J.*

## **AGRADECIMIENTO**

El presente trabajo fue financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Privada Antenor Orrego, a través de su línea de Investigación de Automatización y Robótica, dirigida por el Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini, al que expreso mi total gratitud por el soporte brindado, de la misma forma al Ing. Erick Fiestas Sorogastúa y todos miembros de esta línea de investigación, con los cuales estoy sumamente agradecido por todo el tiempo de trabajo compartido y la oportunidad que se me brindo al pertenecer a este grupo de investigación.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi asesor Ms. Ing. Filiberto Azabache Fernandez, por todo su aporte y ayuda brindada a lo largo del desarrollo de este trabajo, para así culminar esta etapa en mi vida profesional.

A todos los ingenieros que pertenecen a la familia de Ingeniería Electrónica de nuestra Universidad, que motivaron mi desarrollo profesional como personal, así también, a todos mis compañeros que compartieron conmigo estos años: aventuras, amanecidas, mucho esfuerzo y sobre todo, muchas ganas de hacer la diferencia.

Agradezco profundamente a mis padres por el esfuerzo que realizaron a lo largo de mi vida, por todo lo que sacrificaron por mi desarrollo profesional y personal.

A mi pareja, durante todos estos años compartidos, siempre fue un apoyo incondicional en mi trabajo, en mi vida y en mis sueños. También agradezco a cada uno de los integrantes de mi familia por su apoyo incondicional y en especial a mis queridos abuelitos.

## **RESUMEN**

El trabajo de investigación presenta la implementación de un robot CNC del tipo cartesiano de la marca Farmbot como soporte tecnológico para el desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes para el proceso de control de calidad en viveros industriales. Partiendo de la estructura metálica, los componentes que comprende el sistema electrónico como firmware, herramientas y la visión artificial, finalmente el desarrollo de algoritmos para el procesamiento de imágenes a través de internet.

## **ABSTRACT**

This research presents the efficient implementation of a CNC Farmbot Cartesian robot for the development of algorithms in image processing and the design of programs via Internet for robot applications in orchards and industrial nurseries. First, the mechanical-electrical structure of the robot is implemented. Second, electronic components, firmware, robots work tools and the artificial vision are installed. Finally, the development of algorithms for the processing of images through the internet.



# ÍNDICE GENERAL

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b>                                   | <b>15</b> |
| 1.1. Realidad problemática.                              | 15        |
| 1.2. Delimitación del problema.                          | 16        |
| 1.3. Características problemáticas                       | 16        |
| 1.4. Formulación del problema                            | 18        |
| 1.5. Formulación de la Hipótesis                         | 18        |
| 1.6. Objetivos   | 18        |
| 1.6.1.General  | 18        |
| 1.6.2.Específicos  | 18        |
| 1.7. Justificación de la investigación                   | 19        |
| 1.7.1.Importancia de la Investigación                    | 19        |
| 1.7.2.Viabilidad de la Investigación                     | 19        |
| 1.8. Limitaciones del estudio                            | 19        |
| 1.9. Aportes   | 19        |
| <b>II. MARCO TEÓRICO</b>                                 | <b>20</b> |
| 2.1. Antecedentes de investigación.                      | 20        |
| 2.2. Fundamentación Teórica.                             | 22        |
| 2.2.1.Definición de viveros.                             | 22        |
| 2.2.2.Calidad de los plantines.                          | 27        |
| 2.2.3.Robótica en la agricultura.                        | 28        |
| 2.2.4.Selección del robot.                               | 30        |
| 2.2.4.1. Máquina de Control Numérico Computarizado (CNC) | 30        |
| 2.2.4.2. Control Numérico (CN)                           | 30        |
| 2.2.4.3. Ventajas del control numérico.                  | 31        |
| 2.2.4.4. Elementos de un sistema CNC                     | 31        |
| 2.2.5.Equipo principal, robot Farmbot.                   | 33        |
| 2.2.5.1. Configuración Cartesiana                        | 34        |
| 2.2.5.2. Estructura metálica                             | 35        |
| 2.2.5.3. Sistema electrónico                             | 39        |
| 2.2.5.4. Software de aplicación                          | 42        |
| 2.2.5.5. Sistema de visión artificial                    | 44        |

|   |            |
|---|------------|
| 2.3. Definición de términos básicos. _____  | 45         |
| <b>III.MATERIAL Y MÉTODOS: _____</b>  | <b>46</b>  |
| 3.1. Material _____   | 46         |
| 3.1.1. Población y muestra _____  | 46         |
| 3.1.2. Unidad de Análisis _____   | 46         |
| 3.2. Metodología _____  | 46         |
| 3.2.1. Nivel de investigación _____   | 46         |
| 3.2.2. Diseño de investigación _____  | 46         |
| 3.2.3. Procedimientos _____   | 46         |
| 3.2.4. Variables y definición operacional _____   | 47         |
| 3.2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos. _____   | 49         |
| 3.2.5.1. Observación de campo experimental, desarrollo del robot CNC tipo<br>cartesiano _____         | 49         |
| 3.2.5.2. Diagrama de flujo, control de calidad en plantines mediante<br>procesamiento de imagen _____ | 50         |
| 3.2.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos. _____   | 50         |
| 3.2.6.1. Desarrollo del robot CNC tipo cartesiano _____   | 50         |
| 3.2.6.2. Algoritmos de procesamiento de imágenes. _____   | 68         |
| <b>IV.RESULTADOS _____</b>  | <b>76</b>  |
| 4.1. Características del robot. _____   | 76         |
| 4.2. Configuración y calibración del robot. _____   | 77         |
| 4.3. Planeamiento de trayectoria. _____   | 81         |
| 4.4. Plataforma de desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes. _____                       | 82         |
| <b>V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS _____</b>   | <b>83</b>  |
| <b>VI.CONCLUSIONES _____</b>  | <b>84</b>  |
| <b>VII.RECOMENDACIONES _____</b>  | <b>85</b>  |
| <b>VIII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____</b>  | <b>86</b>  |
| <b>IX. ANEXOS _____</b>   | <b>90</b>  |
| <b>ANEXO 03: Diseño propio de herramienta para manipulación de plantines</b> _____                    | <b>120</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Conexiones de pines con sus respectivos valores _____                          | 38 |
| Tabla 2: Descripción de los componentes principales del sistema electrónico del robot _ | 51 |
| Tabla 3: Prueba de valores en velocidades para la configuración de los motores _____    | 56 |
| Tabla 4: Valores de las alturas de las plantas durante 10 días de crecimiento _____     | 75 |
| Tabla 5: Velocidades para un correcto funcionamiento _____                              | 78 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Semillero, primera etapa de crecimiento. _____  | 23 |
| Figura 2: Técnicas de trasplante (repique) y cuidados en un vivero, segunda etapa de crecimiento. _____                                       | 23 |
| Figura 3: Distribución y conservación de plantas dentro de un lugar adecuado para su crecimiento, sea en un ambiente cerrado o abierto. _____ | 24 |
| Figura 4: Finalmente, los plantes seleccionados con las características necesarias son llevadas al campo. _____                               | 24 |
| Figura 5: Bandejas de plantines (6*12). _____   | 26 |
| Figura 6: Componentes de la calidad de los plantines de un vivero. _____  | 27 |
| Figura 7: Proyecto AGROBOT diseñado para la recolección de fresa de manera. _____   | 29 |
| Figura 8: Robot Farmbot UPAO. _____   | 30 |
| Figura 9: Elementos resaltantes de la maquina CNC. _____  | 32 |
| Figura 10: Husillos de rodamientos de bolas, CNC. _____   | 33 |
| Figura 11: Configuraciones básicas de robots manipuladores industriales. _____  | 34 |
| Figura 12: Estructura metálica y base de madera del Farmbot. _____  | 36 |
| Figura 13: UTM, permite el acople a cada de las herramientas del robot. _____   | 38 |
| Figura 14: Sistema electrónico. _____   | 40 |
| Figura 15: Diagrama de bloques basado en sistema embebido del robot. _____  | 41 |
| Figura 16: Front end o sistema de interacción Usuario- Robot. _____   | 42 |
| Figura 17: Imagen procesada mediante el software del robot. _____   | 45 |
| Figura 18 Proceso de armado de la estructura mecánica del robot. _____  | 50 |
| Figura 19: Sistema de ventilación del sistema electrónico. _____  | 54 |
| Figura 20: Entorno del software de aplicación. _____  | 55 |
| Figura 21: Ubicación de las coordenadas de las herramientas, así como el punto inicial de la bandeja de trabajo. _____                        | 57 |
| Figura 22: Lista de comandos de programación para el planeamiento de trayectoria del robot, junto con el color de cada comando. _____         | 58 |
| Figura 23: Diagrama de flujo general. _____   | 60 |
| Figura 24: Apartado de Farmware donde se desarrolla el procesamiento de imágenes y datos. _____   | 64 |
| Figura 25: Calibración de la cámara para trabajos sobre bandejas de plantines. _____  | 66 |
| Figura 26: Detector de hierba, aplicado para control de calidad en plantines de alcachofa _____   | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 27: Prueba de valores aplicado a plantines de alcachofa. _____  | 67 |
| Figura 28: Estructura de desarrollo del sistema operativo del farmbot. _____                                   | 68 |
| Figura 29: Flujo de información del robot a través de los diferentes sistemas _____                            | 69 |
| Figura 30: Esquema de desarrollo en nuevas aplicaciones del robot. _____                                       | 70 |
| Figura 31: Estructura del cuerpo del programa para la detección del contorno de una planta.<br>_____           | 72 |
| Figura 32: Estructura del archivo manifest.json, para la instalación de nuestro programa en<br>el robot. _____ | 73 |
| Figura 33: Lugar de instalación de nuestro programa a través del Firmware. _____                               | 73 |
| Figura 34: Control de calidad y crecimiento de plantines de alcachofa. _____                                   | 74 |
| Figura 35: Trabajo realizado durante 1 hora en el día 25-04-2018. _____  | 80 |
| Figura 36: Trabajo realizado durante 1 hora en el día 23-04-2018. _____  | 80 |
| Figura 37: Desarrollo de algoritmos de prueba en procesamiento de imágenes. _____                              | 82 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1: Numero de fallas por día, por un periodo de 3 meses. _____   | 63 |
| Gráfico 2: Tipo de falla por día, FP: Falla de precisión relacionado a la pérdida de pasos por los motores. Fs/Fci: Falla del servidor o de conexión a internet relacionado al punto de acceso. _____ | 65 |
| Gráfico 3: Eficacia del funcionamiento del robot. _____   | 79 |

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Realidad problemática.

El sector agroindustrial es una actividad fundamental en la economía de los países, en especial en aquellos en vías de desarrollo como es el Perú. El comportamiento actual de las exportaciones peruanas respondió al crecimiento de dos subsectores: minero (14,4%) y agrícola tanto tradicional (21,4%) como no tradicional (6,1%). Entre enero y noviembre del 2017, las agroexportaciones peruanas sumaron un total de US\$5.184 millones, lo que representa un crecimiento de 7,2% respecto al similar periodo del 2016 (ADEX, 2017). Según cifras del INEI, en el 2012 el sector agropecuario emplea al 46.64% de la población peruana, de los cuales el 1.28% son de manera permanente y 98.71% de manera eventual, siendo el principal ingreso económico de las familias (Instituto Nacional de Estadísticas e Informática, 2012).

La Libertad es considerado el primer lugar en el ranking de valor bruto de la producción 2016 en el sector agrícola, considerado tercer lugar en exportaciones agrarias tradicionales y no tradicionales 2011 – 2016 con 743 miles de millones de dólares anuales (MINAGRI, 2017). Entre los productos de mayor producción a nivel nacional tenemos: alcachofa, espárrago, arroz, papa y maíz, pero las principales exportaciones de la región son los espárragos preparados o conservados: 15.5%; Espárragos frescos o refrigerados: 13.0%; arándanos rojos: 11.9% y paltas frescas y secas en 11.4% (MINAGRI, 2017). Este crecimiento se debe, en gran parte, al uso de plantines (estado primario de las plantas productoras) que provienen de los viveros industriales que actúan en la fase inicial del ciclo de trabajo, proveyéndolas de plántulas con la cantidad y calidad que garanticen una producción que satisfaga la demanda del mercado (Viveros Génesis, 2017). Existen dos tipos de siembra: siembra directa que colocan las semillas directamente al terreno y la siembra indirecta que se realiza mediante la producción de plántulas en un ambiente especial para luego, mediante el proceso de trasplante (Foncodes, 2014), ser llevado al terreno. Estas plántulas, algunas repotenciadas genéticamente, son cuidadas mediante un sistema de control estricto de los parámetros externos de las plantas, para que estén libre de enfermedades y lleguen a crecer adecuadamente (proyecto CHAVIMOCHIC, 2017).

El proceso actual de control de crecimiento de las plantas se realiza mediante la monitorización de los parámetros de crecimiento, como son la temperatura, humedad, iluminación y las dimensiones morfológicas de las plantas que lo realizan de manera manual (GUTIERREZ, 2018), proveyendo a la plantas las características sobresalientes como son precocidad, uniformidad de crecimiento, vigor de tallos y raíces, excelente sanidad y una aclimatación especial que reduce el estrés propio del cambio de ambiente, cuando la plántula es trasplantada al campo definitivo (Agronegocios Génesis , 2017).

El control de calidad en las plántulas se realiza mediante métodos de observación y medición manual del personal calificado y en base a su experiencia clasifica la información obtenida, basándose en características como, cuando la plántula cuenta con dos hojas verdaderas (primeras hojas de la planta) y dependiendo si son semillas grandes cuenta con 4 hojas verdaderas o 10 centímetros de altura. Para la inspección de las raíces recomiendan usar un elemento adecuado tal como un clavo grande u otro instrumento. Se afloja el sustrato con mucho cuidado para no causar daño a la raíz de la plántula, después, se procede a extraerla, el acopio se realiza en un recipiente con agua o lodo (mezcla de agua con tierra), operación que debe ser realizada bajo sombra, a fin de evitar la pérdida de humedad de la plántula. Acá se hace una primera selección, desechando las plántulas muy pequeñas, bifurcadas o defectuosas y enfermas (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014)

## **1.2. Delimitación del problema.**

El presente trabajo será desarrollado en el Laboratorio de Semillas de la carrera profesional de Ingeniería Agrónoma de la Universidad Privada Antenor Orrego, con el robot CNC tipo cartesiano de la marca Farmbot aplicado a plantines de alcachofa de Agronegocios Genesis.

## **1.3. Características problemáticas**

- Falta de soporte tecnológico en diferentes procesos de un vivero industrial, entre ellos el control de calidad de plantines.
- Control manual invasivo a los plantines, que lleva al maltrato de las raíces por el personal encargado, debido al uso de herramientas no aptas para este proceso.



- Deficiente control manual en el control de calidad de los plantines, el cual conlleva al gasto incensario de agua y otros insumos en plantas que no llegan a crecer adecuadamente.

### **Análisis de las características de la realidad problemática**

- Actualmente en los viveros industriales del Perú, controlan diferentes parámetros en el entorno de la planta como son el sistema de irrigación, humedad del medio ambiental y humedad del sustrato, mediante el uso de un instrumento de medición adecuado para cada caso, para así crear las condiciones ambientales para un correcto crecimiento de las plántulas. Después del tiempo adecuado para la entrega de estos plantines, el personal calificado (que tenga experiencia empírica en un tipo específico de planta) coteja de manera manual y observacional, el estado de las plantas, tomando en cuenta características morfológicas importantes como son el área foliar, altura de la planta, grosor del tallo y número de hojas, desechando de esta manera aquellas que no cumplen los estándares establecidos por su experiencia. Toda esta información obtenida es de manera aleatoria (sólo se realiza este cotejo en un número determinado de bandejas, ya que, por la gran cantidad de éstas, se generaliza de manera estadística) y no es de dominio público por lo que los parámetros morfológicos de los plantines en estado de crecimiento dentro de viveros industriales no son estandarizados en nuestro país. La tecnología usada dentro de los viveros industriales va aplicada al riego y control de parámetros externos de los plantines (**Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, 2016**), pero más que todo va relacionado al aspecto genético de la planta, por lo que no existe un soporte tecnológico en el proceso de crecimiento.
- Existen diferentes métodos mecánicos en el control de calidad de los plantines en nuestro país, siendo estos invasivos a la raíz, lo que aumenta el riesgo de dañarlos, afectando el crecimiento de éstos. De acuerdo al manual técnico (Foncodes, 2014), se establece que un método para retirar un plantín de la bandeja de crecimiento es usando un clavo u otro medio físico para ablandar el sustrato, de esta manera se facilita la retirada del plantín para ser trasplantada, este método es invasivo a la raíz, por lo que se recomienda tener una experiencia previa en el uso de este proceso. En otros países como Japón, el desarrollo de

tecnologías de procesamiento de imágenes, tomada mediante sensores o cámaras no invasiva a la planta (Fumiki Hosoi, 2011), son diseñadas específicamente para el tipo de producto y el ambiente de trabajo, por lo que esta información de la planta y el estado de sus productos, ayuda a diseñar herramientas de coger y dejar plantas, llamadas también “End-Effector”, para reducir el daño en plantas y raíces (Zhuohua Jiang, 2017).

- En una bandeja de plantines se cultivan de 1 a 2 semillas por casilla, éstas después de 3 meses de crecimiento llegan a tener ciertas características que muestran un crecimiento correcto, pero también existen un 20 a 30 % de las casillas que no crecen correctamente y debido al manejo de miles de bandejas no se perciben, por lo que, al llegar al control en las empresas que solicitan estos plantines, las regresan por incumplir con las condiciones óptimas de crecimiento.

#### **1.4. Formulación del problema**

¿Cómo solucionar la falta de equipo especializado que permita implementar diferentes algoritmos de detección que mejoren el control de calidad de los plantines alcachofa?

#### **1.5. Formulación de la Hipótesis**

El desarrollo de un robot CNC, tipo cartesiano de la marca Farmbot, permite implementar diferentes algoritmos de procesamiento de imagen para mejorar el control de calidad en plantines de alcachofa

#### **1.6. Objetivos**

##### **1.6.1. General**

- Desarrollar e implementar un robot CNC del tipo cartesiano “Farmbot” para dar soporte a la implementación de algoritmos de procesamiento de imágenes al proceso de control de calidad de plantines de alcachofa.

##### **1.6.2. Específicos**

- Adquirir y ensamblar el robot CNC tipo cartesiano de la marca Farmbot.
- Investigar la estructura de funcionamiento del robot, siguiendo las etapas: estructura metálica, sistema electrónico, software de aplicación y su sistema de visión artificial.
- Configurar y calibrar del funcionamiento del robot en el entorno de trabajo.

- Establecer el planeamiento de trayectoria del robot.
- Desarrollar un trabajo consecutivo del robot durante 3 meses, que replique trabajos realizados dentro de un vivero industrial.
- Establecer los parámetros para el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes para el control de calidad de plantines de alcachofa.

## **1.7. Justificación de la investigación**

### **1.7.1. Importancia de la Investigación**

Ante la importancia del sector agroindustrial, las soluciones tecnológicas que soporten los procesos dentro de viveros industriales son necesarios e importantes para el desarrollo de nuestro país. Un control adecuado y no invasivo durante el proceso de crecimiento de los plantines, proporciona un producto de alta calidad, usando menos recursos hídricos y estableciendo un patrón de crecimiento de la alcachofa.

### **1.7.2. Viabilidad de la investigación.**

El presente trabajo se desarrolla como parte del proyecto de Investigación con Resolución Rectoral N 4231-2017-R-UPAO (Anexo 08) titulado: “Desarrollo y construcción de un sistema robotizado para optimizar el repique de plantines en viveros industriales de la región La Libertad-Perú”.

## **1.8. Limitaciones del estudio**

El robot de la marca Farmbot trabajo con su propio servidor web, por lo que el funcionamiento del equipo depende directamente del funcionamiento del servidor web Farmbot.

## **1.9. Aportes**

El desarrollo de un robot CNC tipo cartesiano de la marca Farmbot como soporte tecnológico para diversos procesos en viveros industriales.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de investigación.

Hiromi E. y Tsuyoshi M. (1976 – 1979) en su investigación que duró 4 años “Computer Control of Plant Growth by Image Processing”, se propuso establecer una metodología de control de crecimiento de plantas mediante el procesamiento de imágenes, por lo que su trabajo comprende 4 partes, que son:

- *“Mathematical Representation of Relation between Growth and Pattern Area Taken in Photographs of Plants”.*
- *Pattern Recognition of Growth in On-line System.*
- *Image Processing for Evaluation of Plant Growth in Practical Cultivation.*
- *Digital Image Processing of Reflectance in Different Wave Length Regions of Light for Evaluating Vigor of Plants.*

Esta investigación se propuso como objetivo plantear una metodología científica para obtener información sobre el crecimiento de las plantas, mediante el uso de una cámara, que recolecta fotos en diferentes ángulos, tanto de manera vertical (0°, 45° y 90°) como de manera horizontal (0°, 90°, 180° y 270°), estableciendo un patrón de correlación entre el área del patrón fotografiado y el crecimiento de la planta. Obteniendo como resultado un proceso completo de control de crecimiento de una planta, partiendo con el desarrollo de un sistema informático para el procesamiento de imágenes, sistema de adquisición de datos morfológicos de la planta, estructura metálica que soporta todo el sistema y un método para la evaluación fisiológica y patológica de las plantas, mediante el procesamiento de imágenes de reflectancia. El principal aporte de esta investigación es la metodología establecida para el control de crecimiento en plantas, mediante un método no invasivo que es el procesamiento de imágenes.

Arda A., Anıl Ç. y Burak P. (2017) en la investigación “Image Analysis Applications in Plant Growth and Health Assessment”, se propuso realizar un estudio de las tecnológicas usadas en el procesamiento de imágenes para analizar la salud de las plantas, información que ayuda al fenotipado de las plantas, proponiendo así, nuevos sistemas de análisis de imágenes para el control de

crecimiento y la evaluación de las plantas. Mediante una metodología sintética, propuso un estado del arte, donde muestra un panorama amplio acerca de las técnicas de recolección de datos que actualmente se están usando los métodos de monitoreo para el crecimiento y la salud de las plantas estableciendo concretamente las ventajas y el proceso que sigue cada tipo de metodología. El principal aporte al trabajo de investigación es la clasificación de la información recibida del procesamiento de imágenes donde integra algoritmos de interpretación innovadores y eficientes, iniciando así, el uso de máquinas de aprendizaje “machine-learning” para aumentar la velocidad y precisión de estos procesos dentro de las distintas etapas de crecimiento.

Zhuohua J., Yang H., Huanyu J. y Junhua T. (2010) en la investigación “Design and force analysis of end-effector for plug seedling transplanter”, se propuso como objetivo el diseñar un “end-effector” o herramienta de trasplante, mediante una metodología analítica estableció un análisis mecánico del funcionamiento de una garra de 4 agujas de metal para penetrar el sustrato y no dañar la raíz de plantines que se encuentran en bandejas, estableciendo un trabajo del 100% y un daño en raíces del 17%. El principal aporte al trabajo de investigación es establecer las condiciones y características de un “end-effector” para un trabajo con bandejas de plantines, el cual se tomará como referencia para el diseño de una herramienta compatible al funcionamiento de un robot CNC.

Emmanuel Nyameke (2013) en su investigación “Feasibility Study of Implementing an Industrial Robot for Induction Hardening Machine”, se propuso como objetivo principal estimar los análisis de costos de implementar un Robot industrial para el suministro de materia prima a una máquina de inducción en la empresa transnacional finlandesa, Bodycote. Usando una metodología analítica y según cálculos, se llegó a la conclusión de que efectivamente, el Robot elegido, sí implica una mejora productiva y económica en la empresa. En 1500 horas, el robot consigue un total de piezas trabajadas de 90'000, mientras que el obrero, 73'125. Además, hay un ahorro de costos fijos de 11'000 euros. El principal aporte al trabajo de investigación es el análisis que se realiza a cada tipo de robot y las ventajas de usar este tipo de automatización en un proceso industrial.

Dongmei P., Fanjun M. y HaiLong W. (2016) en su investigación “Research Progress of Visual Inspection of Tray Seedling and the System of Automatic Transplanting” se propuso como objetivo el estudio acerca del de las nuevas tecnológicas aplicadas a 3 etapas dentro de la inspección automática de plantas en china, que son:

- Técnicas de inspección visual.
- Actuador final.
- Sistema de control y optimización de ruta.

Mediante una metodología analítica este trabajo propone un sistema automatizado para afrontar los problemas que tienen dentro de estas 3 etapas, dando como resultado mejorar la tecnología de trasplante automático mediante el estudio y desarrollo en visión artificial, controlar el entorno de crecimiento de la planta y proponer equipos versátiles para la manipulación de plantas. El principal aporte al trabajo de investigación es que nos brinda una estructura de funcionamiento similar al como el que se propone en el desarrollo del proyecto.

## **2.2. Fundamentación Teórica.**

### **2.2.1. Definición de viveros.**

Actualmente, el cambio climático ha afectado significativamente a la agricultura de nuestro país, como lo ocurrido con el fenómeno del niño del 2017, que incremento significativamente las lluvias en nuestro departamento, dejando un total de 16 954 hectáreas afectadas y 11 557 hectáreas perdidas (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2017). El aumento de calor, sequías e inundaciones son más frecuentes en nuestro país, por lo que es necesario implementar nuevas tecnologías que soporten los diferentes procesos que tiene nuestro sector agroindustrial. El proceso de desarrollo de los plantines que son usados dentro del sector agroindustrial se muestra en las figuras 1, 2, 3 y 4, como componente principal se encuentran los viveros industriales que se encarga del cuidado de las semillas hasta determinada etapa de crecimiento para luego ser trasplantadas al campo, parte de estas plantas son nuevas variedades que soportan las sequías y el calor debido a la manipulación genética que poseen.

- Primera etapa:



*Figura 1. Semillero, primera etapa de crecimiento*

**Fuente:** Napoleon J., Cruz M. (2005). *Guía técnica de semilleros y viveros frutales* [Figura]

- Segunda etapa:



*Figura 2. Técnicas de trasplante (repique) y cuidados en un vivero, segunda etapa de crecimiento*

**Fuente:** Rodriguez R. (2010). *Manual de prácticas de viveros forestales* [Figura]

- Tercera etapa:



*Figura 3. Distribución y conservación de plantas dentro de un lugar adecuado para su crecimiento, sea en un ambiente cerrado o abierto.*  
**Fuente:** Cineros M. SERFOR (2015). Estado de situación de los viveros forestales en los departamentos de Ancash, Junín, Pasco, Huánuco y Ucayali [Figura]

- Cuarta etapa:



*Figura 4. Finalmente, los plantas seleccionados con las características necesarias son llevadas al campo.*  
**Fuente:** Red Agrícola (2018). La nueva ola de prosperidad en la Libertad. [Figura] Recuperado: <http://www.redagricola.com/pe/la-nueva-ola-de-prosperidad-en-la-libertad/>



Los viveros por definición son considerados los espacios óptimos para el desarrollo de las semillas durante su primer periodo de vegetación, garantizando una producción alta con el debido control de su ambiente y entorno de crecimiento (Instituto Nacional Tecnológico, 2016). Estos viveros poseen características estructurales las cuales depende de qué tipo de plantas se están desarrollando, por este motivo existen la siguiente clasificación de acuerdo con el tipo de planta:

- **Viveros Forestales:** Destinado a la producción de especies que son usadas como materia prima para diferentes tipos de industrias como son los aserraderos y madereras, especies como eucalipto, casuarina, palo santo, pino, timbo, etc. (Caceres, 2001).
- **Viveros Frutales:** Destinado a la producción de especies frutales como son uva, palto, banano, arándanos, granado, etc. (Caceres, 2001).
- **Viveros Ornamentales:** Destinado a la producción de plantas que son usados con fines decorativos, como son claveles, rosas, petunias, entre otras (Caceres, 2001).

Dependiendo de la finalidad del vivero se clasifica:

- **Vivero temporal o volante:** Es aquel vivero que se establece cerca al lugar donde se trasplantarán, debido a que la producción debe coincidir con la temporada de lluvias y cuya ubicación es de difícil acceso por lo que la duración del vivero es de corto plazo siendo estos de 2 a 4 años. (del Carmen Villarreal, y otros, 2015).
- **Vivero permanente:** Es aquel vivero que se establece en un lugar amplio y de fácil acceso, sea en un área rural o cerca de una ciudad, consta de una infraestructura adecuada para el cuidado de plantas y de personal calificado para esta labor. (del Carmen Villarreal, y otros, 2015).
- **Almácigos:** Llamado también semilleros, se denomina al área de un vivero en el que siembra las semillas, con el fin de obtener una plántula, que después de un tiempo adecuado y de unas condiciones morfológicas de la planta son trasplantadas a unas camas de crecimiento (del Carmen

Villarreal, y otros, 2015), este proceso es conocido como repique. Existen dos tipos de semilleros:

- **Semilleros fijos:** Estos semilleros consisten en piletas que están hechas en el mismo terreno donde serán trasplantadas, construidos de concreto o madera, de forma rectangular y con un interior impermeable para el drenaje (Figura 1). Consta de una infraestructura adecuada para brindar todas las condiciones de crecimiento adecuada a las plantas (del Carmen Villarreal, y otros, 2015).
- **Semilleros portátiles:** Estos semilleros son bandejas de plásticos de fácil uso, cuyos orificios tienen dimensiones que corresponden a la especie que se desea desarrollar (Figura 5) (del Carmen Villarreal, y otros, 2015). Estos tipos de semilleros son los más usados dentro del sector agroindustrial ya que los viveros industriales se encuentran fuera del lugar donde se trasplantarán y estas bandejas son de fácil transporte



*Figura 5. Bandejas de plantines (6\*12)*

**Fuente:** propia

### 2.2.2. Calidad de los plantines.



Figura 6. Componentes de la calidad de los plantines de un vivero  
**Fuente:** (Gabriela Buamscha, y otros, 2012)

Después de la etapa de crecimiento de los plantines en un vivero industrial pasa por un proceso de control de calidad para seleccionar los plantines que crecieron correctamente y que no presentan enfermedades. Este proceso es una etapa crítica, ya que de esto depende la producción y la supervivencia de la planta en el campo, este control lo realiza un personal calificado que comprueba los rasgos morfológicos, fisiológicos y químicos de las plantas (Wakeley, 1954). Uno de los pioneros en la evaluación de calidad de los plantines, Wakeley (1954), establece que “*la clasificación de los plantines en clases se basa en la capacidad de las plantas a sobrevivir al trasplante al campo*” Los atributos de calidad en plantines se muestran en la figura 6, donde el cuidado y control de los factores fisiológicos y químicos en los viveros, afectan a los atributos morfológicos, los cuales, tomando en conjunto, determinan la calidad de las plantas (Gabriela Buamscha, y otros, 2012).

Actualmente el crecimiento de la planta y la salud de esta, son evaluadas manualmente por operarios y por las empresas que la requieran, al no cumplir con la calidad respectiva, se devuelven, lo que conlleva el requerimiento de personal calificado, sin embargo, se maltrata la raíz y la planta por parte del personal al realizar este proceso. Ante esta demanda se requiere de un proceso automatizado y no invasivo en el control de crecimiento de los plantines.

### **2.2.3. Robótica en la agricultura.**

Ante el requerimiento de automatizar los procesos dentro de la agricultura, en especial en procesos de control y recolección dentro del campo y viveros, es que se establecen nuevos estudios de viabilidad en la utilización de robot en la manipulación y control de plantas, esto para establecer parámetros de calidad en la producción y plantas. Estas nuevas tecnologías van enfocadas en las siguientes áreas (Cabrera Aguayo & Barcia Macias, 2018):

- Navegación específica en agricultura.
- Procesamiento de imágenes en agricultura.
- Manejo de terrenos difíciles en agricultura.

En la navegación específica en agricultura hace referencias en el uso de robot cuya trayectoria y estructura mecánica debe ser planteado para el trabajo dentro de un área específica, ya sea en campo o dentro de viveros. La Organización Internacional para la Estandarización define como robot a *“Mecanismo programable en dos o más ejes, con un grado de autonomía, moviéndose dentro de su entorno, para realizar las tareas previstas”* (ISO, 2012), donde también especifica que, el robot debe tener un sistema de control con una interfaz del mismo y que la clasificación del robot es industrial y robot de servicio, de acuerdo a la aplicación prevista. La importancia de la robótica en la agricultura viene aumentando durante los últimos años, donde proyectos como AGROBOT, desarrollado por Buemi (1996) desarrolla un sistema robótico completo que comprende un brazo robótico de seis grados de libertad, utilizado para la recolección de jitomates y para rosear anti criptogámicas a las plantas, un vehículo que lleva el brazo robótico y su cabeza tiene dos micro cámaras para el sistema de visión y el rack VME para el control completo (Buemi, Massa, & Sandini, 1996), Actualmente se viene

implementando nuevas tecnologías como la navegación autónoma basado en LiDAR, sensado 3D mediante sensores de color de corto alcance y sensores infrarrojos de profundidad y una conducción inteligente remoto (figura 7), todo esto implementado en un robot móvil diseñado para la recolección de fresas.

También existen proyectos “open-source” (fuente libre) que vienen desarrollando productos innovadores dentro del área de la agricultura, este es el caso del proyecto de Farmbot (Figura 8), un proyecto que se está desarrollando en Estados Unidos – California – San Luis Obispo, es un proyecto agrícola usando un robot CNC del tipo cartesiano que se encarga del cuidado de huertos (plantado, regado y matar malas hierbas) todo esto controlado media una página web que se puede acceder mediante cualquier equipo que cuente con internet y ciertas características técnicas (laptop, celular. Tablet), el cual permite el control absoluto del robot y la monitorización de este (Farmbot Inc., 2018). Este robot es usado en la presente tesis, por lo que toda la información de funcionamiento será detallada en capítulos posteriores.

La robótica forma parte importante del desarrollo de la agricultura en nuestro país como en todo el mundo, permitiendo mejorar nuestra productividad y cuidar nuestro planeta mediante el uso controlado de agua y la disminución de uso de insecticidas.



*Figura 7. Proyecto AGROBOT diseñado para la recolección de fresa de manera automática.*

**Fuente:** Agrobot Robotic Harvesters url: <http://agrobot.com/>



*Figura 8. Robot Farmbo UPAO.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **2.2.4. Selección del robot.**

Al pertenecer mi campo de estudios al proyecto con Resolución Rectoral N 4231-2017-R-UPAO, este cuenta con equipos ya establecidos, cuyo robot principal es un Robot Farmbot (CNC del tipo cartesiano).

##### **2.2.4.1. Máquina de Control Numérico Computarizado (CNC)**

La máquina CNC , cuyas siglas en ingles significa “Computer Numeric Control”, inicialmente fue desarrollada por la empresa Parsons Corporation en 1940 como una máquina de control numérico (NC) con la finalidad de mecanizar partes de aeronaves. Esta no fue aplicada a la producción manufacturada hasta inicios de los años de 1960s y tomó mucha fuerza por el año de 1972 y una década después por la introducción de los microcontroladores y microcomputadoras (Smid, 2003).

##### **2.2.4.2. Control Numérico (CN)**

Indica Smid (2003, p1), que el control numérico puede definirse como una operación máquina - herramienta por medio de instrucciones específicas para el sistema de control de la máquina, estas instrucciones son una combinación de letras del alfabeto, dígitos y

símbolos seleccionados (por ejemplo el punto decimal, signo porcentual o paréntesis, etc), todas estas instrucciones en un orden lógico y de una forma determinada (Smid, 2003).

#### **2.2.4.3.Ventajas del control numérico.**

Cabe indicar que dependiendo del tipo de trabajo que realiza una maquina CNC, algunas ventajas serán más adecuadas para un proceso que para otro, tomando en cuenta estos aspectos, se detalla a continuación las ventajas de un control numérico:

- Reducción del tiempo de configuración, este proceso es manual, pero al poseer características modulares, herramientas estándar, localizadores fijos, cambio automático de herramientas y otras características avanzadas, hacen que la configuración sea más eficiente (Smid, 2003).
- Reducción de tiempo de entrega, el tiempo durante la primera configuración, programación y prueba del proceso, este queda establecido para los siguientes procesos, reduciendo de esta manera el tiempo de entrega de los demás productos.
- El alto grado de precisión y repetibilidad que poseen las modernas maquinas CNC (componentes electrónicos que poseen) es el mayor beneficio que tiene el usuario.
- CNC de contornos y centros de mecanizados proveen una variedad de piezas que son usadas por la electrónica e industrias para moldear complicadas formas mediante un software de construcción 3D (Smid, 2003).

#### **2.2.4.4.Elementos de un sistema CNC**

Un sistema CNC posee los siguientes elementos importantes (Figura 9).

- Dispositivo de entrada, la transferencia de datos entre CNC y la computadora suele usar comunicación RS-232 y comunicación ethernet.

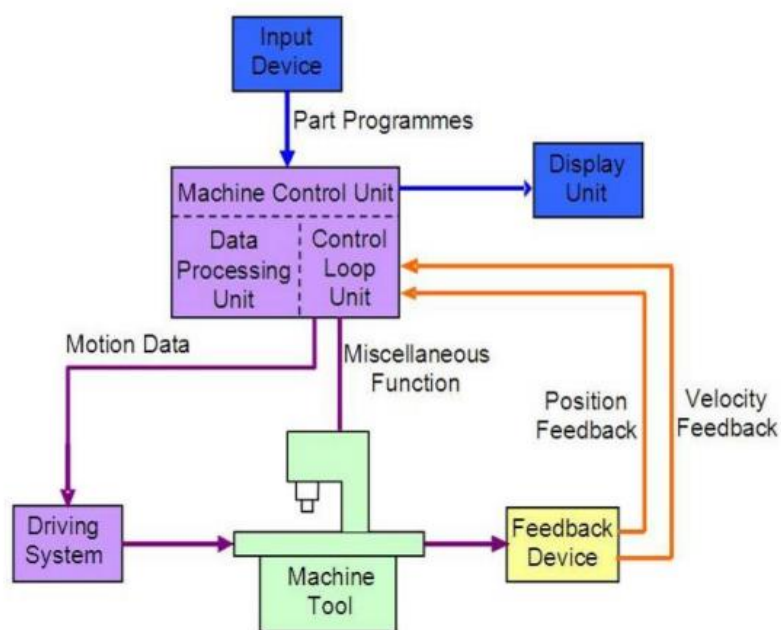


Figura 9. Elementos resaltantes de la maquina CNC  
**Fuente:** (Fiestas Sorogastúa, 2017)

- Controlador, considerado el corazón del sistema CNC, encargado de realizar el control del sistema, este posee dos subunidades de control, Unidad de proceso de información y la unidad de control de bucle, el primero se encarga de recibir, interpreta, codificar para que pueda ser entendido por la máquina y el segundo se encarga de recibir los datos y traducirlos a señales eléctricas hacia los drivers (Industrial center, 2009).
- Máquina – herramienta: Es el actuador del sistema, pudiendo ser esta una herramienta o equipo adicional, el material del que están hechos deben ser resistentes y ligeros, siendo los husillos de rodamientos los componentes más importantes para el desplazamiento (figura 10).
- Sistema de manejo, el cual se encarga del movimiento de la maquina CNC, donde la precisión y la repetibilidad depende de este sistema de manejo, existen tres tipos de motores que son comúnmente usados: DC o AC servo motor, motores paso a paso y motores lineales (Industrial center, 2009).



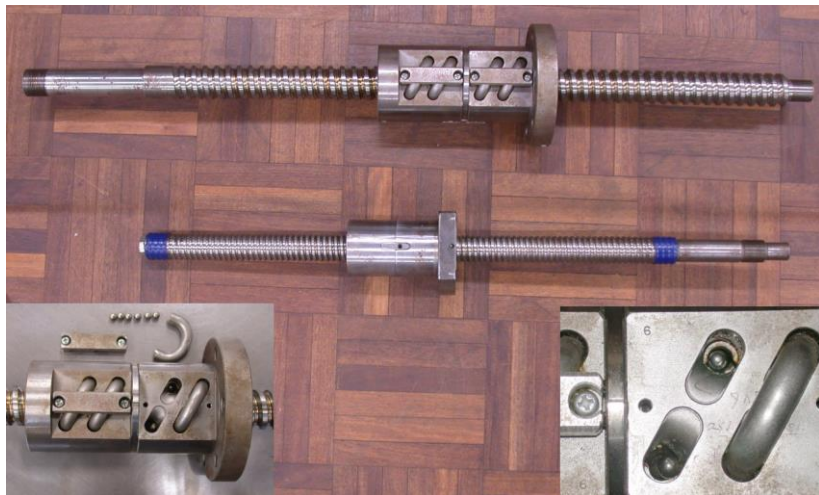


Figura 10. Husillos de rodamientos de bolas, CNC

**Fuente:** obtenida de url:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Husillo#/media/File:BallScrews-with-detail-insets.jpg>

- Dispositivo de retroalimentación, elemento encargado de evaluar la posición y velocidad de los ejes constantemente para tener un trabajo preciso, este elemento pertenece a un control de lazo cerrado por lo que existen dos tipos de retroalimentación: Dispositivos de posición y de velocidad, dentro de los dispositivos de posición se encuentran transductores lineales y encoder rotatorio, por el lado de los dispositivos de velocidad encontramos a los tacómetros DC.
- Unidad de display. Se encarga en la interacción entre el hombre y la máquina. Éste debe mostrar valores y gráficos importantes para el funcionamiento de CNC.

### 2.2.5. Equipo principal, robot Farmbot.

En el año del 2014, el ingeniero Rory Aronson junto a sus colegas Tim Evers y Rick Carlino desarrollaron un proyecto agrícola de CNC agropecuario de precisión, de código abierto, consiste en un CNC del tipo cartesiano (ejes X, Y y Z) que se encarga del cuidado completo de un pequeño cultivo (Farmbot Inc., 2018). Este robot forma parte principal del presente proyecto por lo que a continuación se detalla todos sus componentes.

### 2.2.5.1. Configuración Cartesiana

Como estructura básica de robots manipuladores se encuentran las configuraciones cartesianas, cilíndricas, polar y angular (figura 11). La configuración cartesiana establece que la posición de un punto se efectúa mediante las coordenadas cartesianas (X, Y, Z), donde los valores que toma el extremo del brazo son las variables articulares correspondientes a las coordenadas, por consiguiente en esta configuración se simplifica la tarea del controlador para la generación de trayectorias mediante secuencias de puntos expresados en coordenadas (Ollero Baturame, 2001).

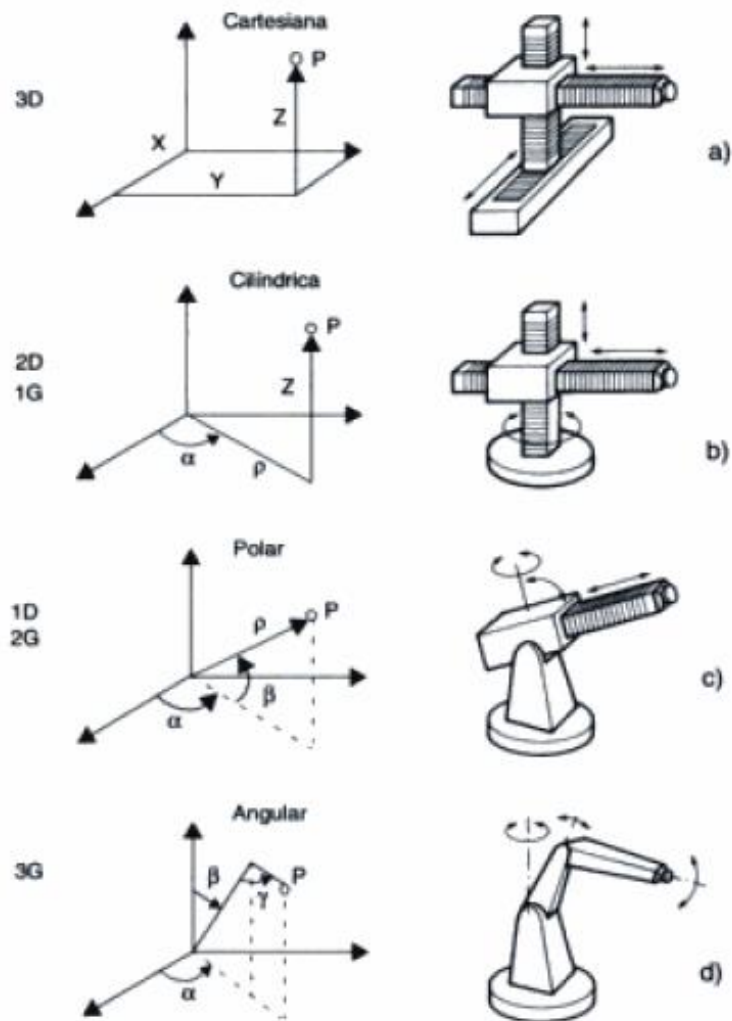


Figura 11. Configuraciones básicas de robots manipuladores industriales  
Fuente: (Ollero Baturame, 2001)

### **2.2.5.2.Estructura metálica**

El sistema mecánico del robot tiene una morfología cartesiana, es decir que sus movimientos son lineales o prismáticos en sus tres grados de libertad de posición (X, Y, Z). Presenta una dimensión de 3 metros de largo por 1.5 metros de ancho y 1.8 metros de altura (con el eje Z desplazado a su máxima altura). Se ha agregado una base móvil de madera para que soporte al robot con las mismas dimensiones descritas previamente excepto que la altura es de 40 centímetros la que sirve como espacio de trabajo del robot.

Cabe notar que todas las piezas son replicables mediante impresora 3D industrial o maquinas inyectoras de plástico (según el material de la pieza en particular). Se dispone del modelo CAD de todas las piezas lo que facilita su obtención con tecnología de manufactura computarizada. En esa línea, todos los componentes del sistema robótico son comercialmente adquiribles haciéndolo un sistema altamente replicable.

La estructura mecánica consta de una diversidad de piezas que hay que ensamblarlas una a una según el diseño en particular que se desee dar (recuérdese que es un sistema open source tanto en hardware como en software), sin embargo, se debe tener cuidado en el montaje de las diferentes piezas de diversos tamaños dado que si se desea tener un movimiento suave y continuo se debe cumplir con el adecuado orden de ensamblaje y calibración entre ellas.

El robot se desliza sobre perfiles de aluminio lo que permite un movimiento suave y con mínima fricción. Los perfiles vienen originalmente de 1.5 m. y de 0.5 m. A fin de implementar las dimensiones de nuestro diseño (descrito previamente) se ha unido dos perfiles de 1.5 m. para obtener el largo de 3 metros; el ancho con un solo perfil de 1.5m. y para la altura se ha usado un perfil de 0.5m. que integrado al brazo del eje Z hacen una altura total de 1.8m.

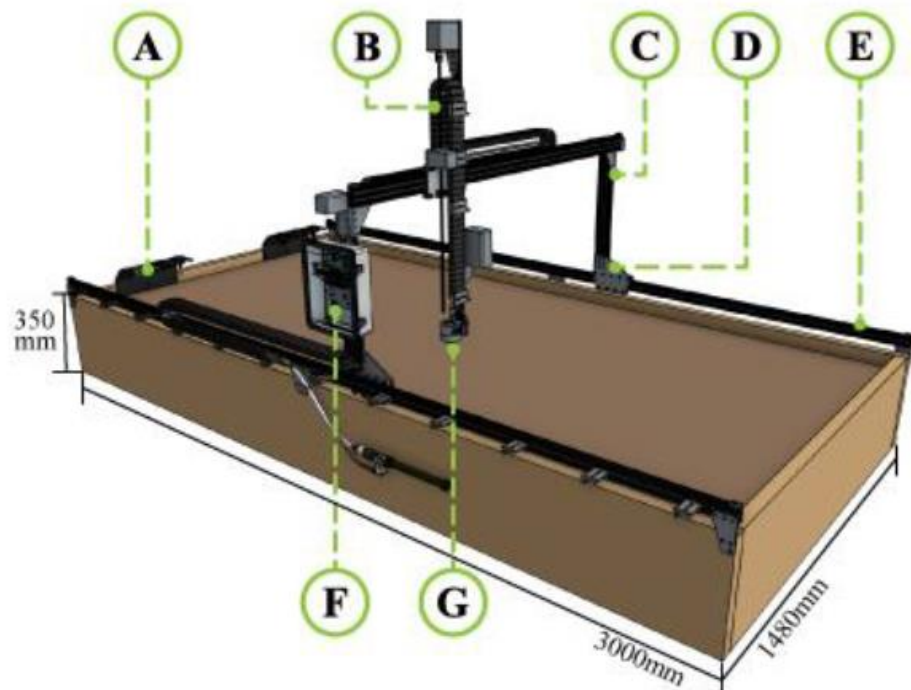


Figura 12. Estructura metálica y base de madera del Farmbot.

**Fuente:** Elaboración propia

Las partes fundamentales del sistema mecánico del robot se describen a continuación y para su mejor comprensión se asocia la explicación a la Figura 12, donde cada parte se identifica con una letra mayúscula:

- A. Bandeja de herramientas: Bandeja donde se colocan todas las herramientas que utilizará dentro del proceso, herramientas como coger y dejar; semillero; regador; punzón; sensor de humedad, etc. El acople es mediante campo magnético dado que las herramientas contienen imanes ubicados de tal forma que sus campos magnéticos son opuestos al campo magnético generado por los imanes ubicados en el UTM (ver letra G).
- B. Soporte Vertical: Determina el Eje Z. El movimiento sobre el soporte vertical permite alcanzar la coordenada, z, de una posición cartesiana (x,y, z).
- C. Portal (Gantry): Perfil de aluminio que soporta el desplazamiento del robot en dirección del eje Y. Geométricamente se presenta como un puente elevador que une los dos perfiles del eje X y que a su vez soporta al eje Z y a la caja electrónica del robot. El

movimiento sobre el Gantry permite alcanzar la coordenada, y, de una posición cartesiana (X, Y, Z).

- D. A Carro deslizante (Cross-slide): Une los Tracks y el Gantry mediante un acople móvil que se desliza sobre el eje X. Su movimiento permite alcanzar la coordenada, x, de una posición cartesiana (X, Y, Z).
- E. Pistas (Tracks): Perfil de aluminio que soporta el desplazamiento del robot en dirección del eje X (en nuestro diseño la longitud de X es de 3m.). Es importante que se asegure la horizontalidad en las pistas a fin de evitar que el robot se detenga por algún desnivel y considere que ha llegado a un tope mecánico.
- F. Caja Electrónica (F): Contiene el sistema electrónico.
- G. Interface de montaje universal (UTM): Permite que el robot se acople a diferentes herramientas y así ejecutar diferentes trabajos, se ubica al extremo del eje Z.

La transmisión mecánica del robot es mediante correas dentadas y poleas ranuradas que generan movimientos suaves en los ejes, no requieren de un mantenimiento continuo y trabaja eficientemente en entornos húmedos y de variada temperatura. Los cables del sistema van en porta cables flexibles lo que minimiza su desgaste y los protege contra los rayos solares y el agua.

El dispositivo que permite el intercambio de herramientas se denomina UTM (Universal Tool Mount, figura 13), el cual permite acoplarse magnéticamente mediante 3 imanes de material Neodymium (NdFeB) a cada una de las herramientas. La disposición de los pines de conexión se muestra en la tabla 1, las cuales serán usadas de para el desarrollo de las trayectorias de movimiento del robot.

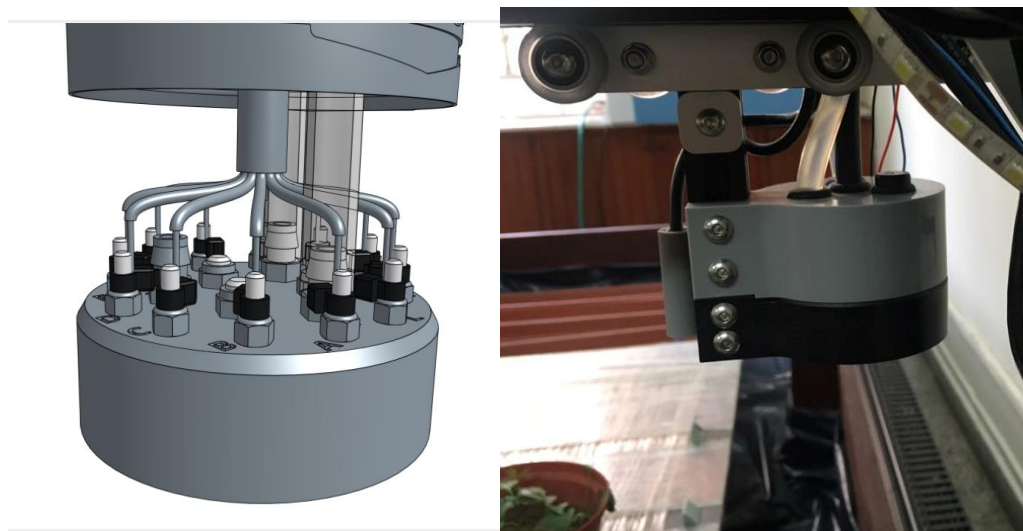


Figura 13. UTM, permite el acople a cada de las herramientas del robot.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1: Conexiones de pines con sus respectivos valores

| UTM PIN/ UTM CABLE | NUMERO DE PIN               | FUNCIÓN                       |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| A/ ROJO            | +5V                         | Alimentación en general       |
| B/AMARILLO         | Ground                      | Ground                        |
| C/ VERDE           | Pin D63 - Digital - in      | Verificación herramienta      |
| D/NEGRO            | Pin D59 (A5) –<br>Analog in | Lectura de señales analógicas |
| E/BLANCO           | Pin 40                      | Libre                         |
| F/MARRÓN           | Pin 64                      | Libre                         |
| G/AZUL             | Pin 42                      | Libre                         |
| H/PLOMO            | Pin 44                      | Libre                         |
| I/NARANJA          | Pin 65                      | Libre                         |
| J/MORADO           | Pin 66                      | Libre                         |
| K/ROSAO            | Pin 52                      | Libre                         |
| L/CYAN             | Pin 53                      | Libre                         |

Fuente: (Farmbot Inc., 2018)

Esta numeración de pines es importante, ya que durante la programación de trabajos del robot se requiere leer o escribir estas variables con nuevos valores, permitiendo así desarrollar procesos en viveros industriales.

Cabe notar que todas las piezas del robot son replicables mediante impresora 3D industrial o máquinas inyectoras de plástico (según el material de la pieza en particular). Se dispone del modelo CAD (diseño asistido por computador) de todas las piezas lo que facilita su obtención con tecnología de manufactura computarizada. En esa línea, todos los componentes del sistema robótico son comercialmente adquiribles haciéndolo un sistema altamente replicable, al poseer los CADs de las piezas nos permite el desarrollo de una herramienta la cual se utilizará en este proyecto para trasplantar los plantines. La estructura mecánica consta de una diversidad de piezas que hay que ensamblarlas una a una según el diseño en particular que se desee dar (recuérdese que es un sistema open source tanto en hardware como en software), sin embargo, se debe tener cuidado en el montaje de las diferentes piezas de diversos tamaños dado que si se desea tener un movimiento suave y continuo se debe cumplir con el adecuado orden de ensamblaje y calibración entre ellas.

### **2.2.5.3.Sistema electrónico**

Los componentes fundamentales del sistema electrónico la componen dos tarjetas electrónicas (figura 14): (1) un Raspberry Pi 3 (ordenador de placa reducida) que es el “cerebro” del robot donde se ejecuta el sistema operativo del Farmbot, envía y recibe información en códigos G (códigos enviados del Raspberri pi al Arduino) al Farmduino (Arduino mejorado para este entorno de trabajo) a través de una comunicación serial USB y se encarga de la comunicación con la aplicación web a través de ethernet o wifi. (2) un Farmduino que es una placa electrónica que combina el microcontrolador de un Arduino Mega (ATmega2560) y una placa RAMPS (diseñaron con el propósito de ser usadas con los drivers de corriente POLOLU), se encarga de

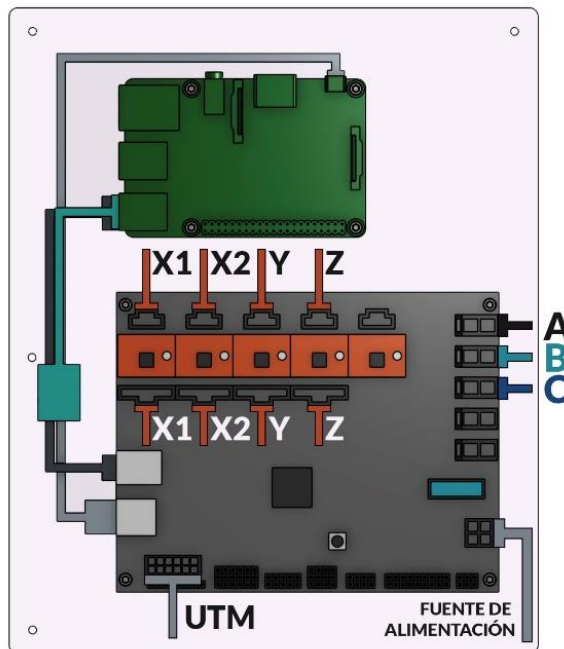


Figura 14. Sistema electrónico.  
Fuente: Elaboración propia

recibir los códigos G del Raspberry Pi, los ejecuta (movimiento de los motores, lecturas de sensores, control de periféricos y demás) y luego envía información en códigos R al Raspberry Pi.

El Farmduino contiene a los drivers de potencia (A4988 a 1.5 amperios) de los motores paso a paso que generan la fuerza para mover el robot. Los que deben calibrarse adecuadamente para que proporcionen la corriente necesaria a fin de lograr una velocidad de trabajo requerida por el usuario sin que ello afecte la seguridad de la electrónica por sobre calentamiento.

Ambas tarjetas descritas previamente, se ubican en una caja de plástico soportada por el Pórtico (Gantry) y hasta ahí llegan todas las señales sensoricas y desde ahí salen todas las consignas de ordenes hacia los actuadores del sistema robótico.

El Raspberry Pi 3 permite ejecutar el sistema operativo del robot que a su vez hace posible programar y monitorear por Internet (nube) y a tiempo real el trabajo del robot mediante un software aplicativo. Para ello se integra un conjunto de tecnologías informáticas (Figura 15) que van desde el front-end web (escritas en lenguaje de mecanografía) que



se vinculan con los servicios web de back-end para contenedorización de aplicaciones (Docker), que desarrolla una plataforma multiusuario en el servidor web de Farmbot (que puede incluir teléfonos inteligentes, tabletas, PC, etc.) y comunicaciones del tipo Message Broker MQTT (protocolo de mensajería) en formato JSON (formato de texto ligero para el intercambio de datos). El sistema operativo Farmbot (que se ejecuta en un Raspberry PI v3, el cerebro en la Fig. 3) hace uso del servicio Nerves (escrito en Elixir y Erland) que hace más eficiente el coste computacional del software de aplicación. Se cuenta además con una propia plataforma del usuario para la programación de tareas del robot, que es bastante amigable e intuitiva para que el usuario no tenga que ser un programador experimentado. El usuario puede crear secuencias, eventos, regímenes de trabajo basados en una variedad de tareas de tipo tales como riego, detección de humedad, siembra y visualización de malezas, entre otros.

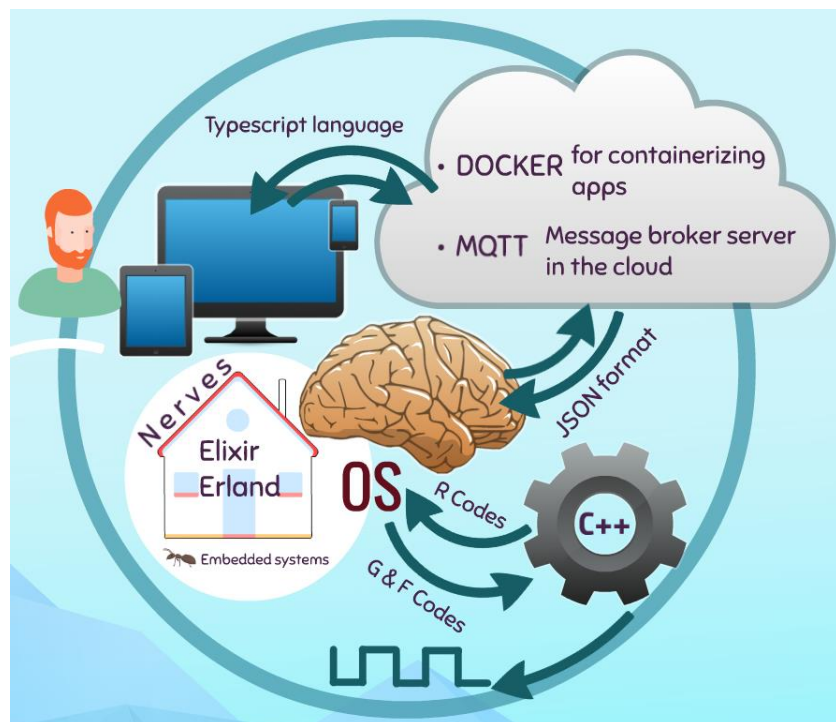


Figura 15. Diagrama de bloques basado en sistema embebido del robot.  
**Fuente:** (Choque Moscoso, Fiestas Sorogastúa, & Prado Gardini, 2018)

#### 2.2.5.4. Software de aplicación

Es una aplicación web desarrollado en TypeScript y usa SQL (lenguaje de consulta estructurada) para gestionar su base de datos. Permite al usuario interactuar con el sistema robótico y programar las aplicaciones de este. El entorno de programación es bastante amigable dado que usa código gráfico que representan objetos agrícolas y que el firmware del sistema asigna una representación matemática para poder actuar sobre ellos internamente. El usuario mediante la aplicación

web se conecta con el módulo de ethernet o wifi del Raspberry Pi del robot a fin de enviarle órdenes de trabajo y no requiere tener conocimientos especializados para programar aplicaciones del robot (Figura 16). Además, a través del aplicativo web se calibra el trabajo del sistema robótico, se crea eventos y regímenes de trabajo, entre otros. Los que luego son presentados al usuario de forma gráfica. Por ejemplo, las herramientas de trabajo del robot se les asignan una posición fija y se indica al software que es la posición de una herramienta en particular, entonces el software lo identifica y le asigna una imagen correspondiente a esa herramienta y es la que se muestra al usuario. Por otro lado, el espacio de trabajo del robot puede ser dividido por zonas y cada zona tener un cultivo diferente (el que se

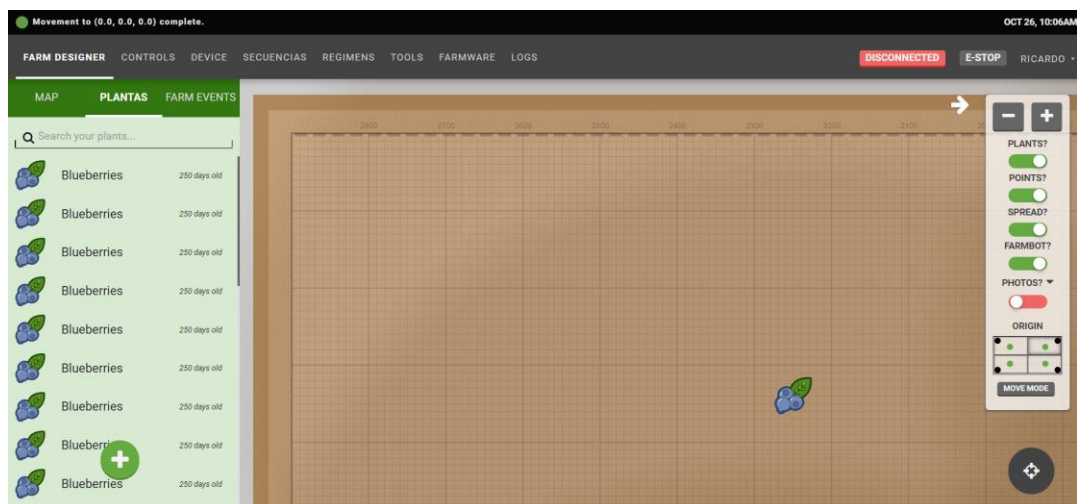


Figura 16. Front end o sistema de interacción Usuario- Robot.

Fuente: (Choque Moscoso, Fiestas Sorogastúa, & Prado Gardini, 2018)

mostrara mediante imágenes según tipo de cultivo) y un solo programa de aplicación para todas las zonas o (si así lo decide el usuario) cada zona con su propio programa aplicativo.

Otra característica relevante del software de aplicación es su alto grado de flexibilidad en la gestión de los programas de trabajo del sistema robótico, dado que pueden ejecutarse de forma automática las veces que se requiera en un rango temporal que puede definirse desde minutos hasta semanas o meses. Por ejemplo, si un cultivo requiere acciones específicas sobre el dos veces al día durante un mes entonces después de diseñar el programa que contiene las acciones a realizar automáticamente se configura el software aplicativo para que este programa se ejecute dos veces al día durante todo un mes. El software tiene un sistema de mensajería a tiempo real con el usuario manteniéndole actualizado del estado de trabajo el programa en ejecución y de los eventos que puedan ocurrir en el mismo. Finalmente, los comandos del software aplicativo son bastante estándares pudiendo con ellos implementar condicionales, bucles, lectura y escritura de periféricos, espera de señales digitales y analógicas, definir el tipo de coordenada cartesiana asignada absoluta o relativa.

Las coordenadas absolutas obligan al robot a ubicarse sobre ellas de forma exacta, y es útil, por ejemplo, para asignar posiciones a las herramientas de trabajo, a las plantas y así general trayectorias que eviten una colisión con su entorno. También se puede aplicar un offset en cada dirección de las coordenadas absolutas facilitando con ello el desarrollo de programas donde se requiere definir posiciones en forma de matriz, muy común en entornos agrícolas o viveros industriales. Las coordenadas relativas se definen en base a un sistema de referencia previo, es decir uno determina la cantidad de movimiento en cada dirección y por defecto coge las direcciones del último sistema de referencia previamente definido. Requieren menos tiempo

computacional y son adecuados para generar trayectorias robot en entornos poco probables de colisión.

#### **2.2.5.5.Sistema de visión artificial**

El sistema de visión artificial está compuesto por una cámara baroscópica cuyas imágenes son procesadas en la nube (servidor de la empresa Farmbot) minorizando en el uso de recursos del sistema electrónico. Programado en Python y OpenCV que identifica la distancia entre los objetos de la imagen y el color de éstas. Si las imágenes presentan una intensidad de color que supera un umbral definido por el usuario (por ejemplo, la intensidad del color verde, común en las plantas) entonces se determina su contorno para finalmente calcular la mínima circunferencia que contiene al contorno previamente definido (figura 17). Esta información hace posible el seguimiento al crecimiento de las plantas y plantines en función a la relación tiempo-desarrollo de las tallos y hojas-color de la planta. También es posible identificar elementos extraños como por ejemplo hierba mala, cabe indicar que todas las plantas o plantines ubicados dentro del espacio de trabajo del robot tienen asociado una representación matemática, lo que es extensible también a la mala hierba identificada por la cámara. De esta forma se genera una trayectoria para que el robot elimine solo la mala hierba. Sin embargo, para obtener un resultado real y eficiente del sistema artificial es fundamental un correcto calibrado del mismo, tanto en distancia como en color a fin de que los objetos en las imágenes obtenidas por la cámara mantengan sus características reales sobre las variables de interés.

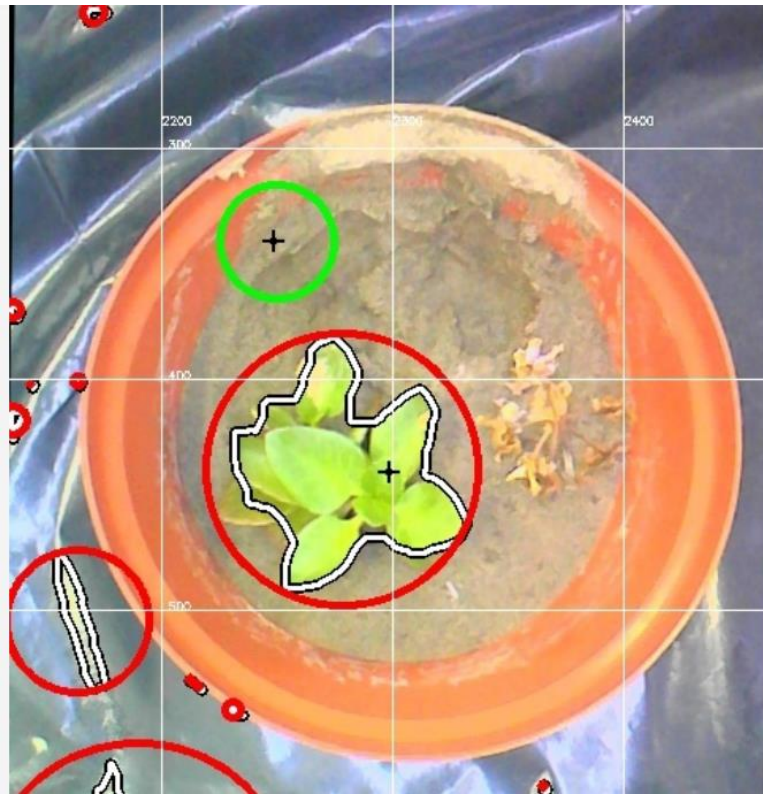


Figura 17. Imagen procesada mediante el software del robot.

**Fuente:** Fuente propia

### 2.3. Definición de términos básicos.

- **Plántula(s):** Plantas durante los primeros meses hasta que desarrolle sus primeras hojas no cotiledóneas maduras
- **Plantín(es):** Plantas que están listas para ser trasplantadas al campo.
- **CNC:** La máquina CNC , cuyas siglas en ingles significa “Computer Numeric Control” es un sistema de automatización que son operadas mediante comandos programados.
- **Raspberry Pi:** Computadora de alto rendimiento, instalada en una placa reducida, diseñada para enseñanza y diferentes aplicaciones.
- **Python:** Lenguaje de programación interpretado que hace énfasis en el código legible.
- **Json:** Formato de texto ligero para el intercambio de datos.
- **Farmduino:** Placa encargada del control del robot, es un Arduino mega ATmega2560 modificado.

### **III. MATERIAL Y MÉTODOS:**

#### **3.1. Material**

- Tesis, trabajos de investigación y papers referentes al procesamiento de imágenes aplicado a plantas y tipos de procesos aplicados al cuidado y control de crecimiento de plantines en viveros industriales.
- Datos técnicos del robot CNC.
- Tesis y trabajos de investigación referentes a temas de fenotipado en plantas y sistemas de control, utilizados en la ingeniería agrónoma.

##### **3.1.1. Población y muestra**

Plantines de alcachofa del vivero industrial Agronegocios Génesis, 4 bandejas de 72 plantines de alcachofa cada una.

##### **3.1.2. Unidad de Análisis**

Plantines de alcachofa.

#### **3.2. Metodología**

##### **3.2.1. Nivel de investigación**

La investigación es de nivel es explicativo.

##### **3.2.2. Diseño de investigación**

El diseño de investigación es de campo.

##### **3.2.3. Procedimientos**

- Adquisición y armado del robot de su estructura metálica y el sistema electrónico.
- Investigación del funcionamiento de la estructura metálica, sistema electrónico, software de aplicación y visión artificial del robot.
- Desarrollo del planeamiento de trayectoria, estableciendo parámetros y pasos de seguridad para el correcto funcionamiento del robot.
- Establecer un trabajo continuo del robot CNC tipo cartesiano “Farmbot” dentro del laboratorio mediante la repetición del programa de un trabajo específico durante 3 meses.
- Investigar el flujo información durante el proceso de procesamiento de imagen que realiza el robot.

- Establecer los parámetros necesarios para desarrollar algoritmos de procesamiento de imágenes aplicadas al control de calidad de plantines de alcachofa.

#### **3.2.4. Variables y definición operacional**

- **Variable independiente**  
Robot Farmbot.
- **Variable dependiente**  
Plataforma de desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes.

| <b>Variable</b>   | <b>Definición conceptual</b>   | <b>Definición operacional</b>   | <b>Indicadores</b>   | <b>Instrumento</b>   |
|---|--|---|--|--|
| <b>Variable independiente:</b><br>Robot Farmbot   | Robot CNC del tipo cartesiano  | Mediante el desarrollo del robot (estructura metálica, sistema electrónico, aplicación web y visión artificial) establecer un trabajo simulando los trabajos realizados en un vivero industrial   | Desarrollo de la estructura metálica y del sistema electrónico.                                | Gráficas y tablas de las configuraciones del robot, estableciendo los valores de aceleración y velocidad.                                    |
|   |  |   | Establecimiento de una generación de trayectoria para simular trabajos en viveros industriales | Gráfica mostrando la eficacia del funcionamiento del robot, así como una tabla de los errores en funcionamiento del robot                    |
| <b>Variable dependiente:</b><br>Plataforma de desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes | Plataforma para el desarrollo de programas en Python, aplicados al procesamiento de imágenes | Mediante la investigación del flujo de información, establecer una metodología para el desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes para el control de calidad en plantines de alcachofa | Metodología para el desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes                      | Tablas y figuras estableciendo los pasos para el desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes en el control de calidad de plantines |



### **3.2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### **3.2.5.1. Observación de campo experimental, desarrollo del robot CNC tipo cartesiano**

Para establecer un trabajo continuo del robot, con el fin de ser utilizado en un vivero industrial, se desarrolló un proceso de 8 minutos que se repitió durante 64 minutos diarios, comprendiendo 8 repeticiones de todo el proceso que comprende los siguientes pasos:

- Realizar un hoyo con la herramienta “Weeder” (Herramienta para hacer hoyos en el sustrato).
- Mediante la herramienta “Seed injector” (Herramienta para coger una semilla mediante una bomba de vacío y una aguja) llevar una semilla al lugar donde se realizó el hoyo.
- Realizar la medición de la humedad del sustrato mediante la herramienta “Soil Sensor” (Herramienta que posee un sensor de humedad).
- Dependiendo del valor devuelto por el sensor de humedad, realizar el riego con la herramienta “Watering nozzle” (Herramienta diseñada con orificios pequeños para el riego) o no realizar el riego.
- Toma de una imagen para el monitoreo del estado de la planta.

Este proceso se repitió durante 3 meses donde se recolectó toda la información de funcionamiento junto con un reporte de problemas. Cabe destacar que las medidas obtenidas mediante el monitoreo son valores sugeridas en trabajo de tesis de la carrera profesional de ingeniería agrónoma, ya que para trabajos más especializados se requiere el apoyo de un ingeniero agrónomo el cual pueda brindarnos información exacta para las condiciones óptimas de crecimiento en la alcachofa.

### 3.2.5.2. Diagrama de flujo, control de calidad en plantines mediante procesamiento de imagen

Para establecer una propuesta tecnológica en el control de calidad en plantines mediante el uso del robot CNC, se realiza una investigación acerca del flujo de información utilizada en la visión artificial del robot, estableciendo los pasos y parámetros considerados en desarrollar nuevas propuestas de trabajo del robot aplicadas al proceso de control de calidad de plantines de alcachofa mediante procesamiento de imagen.

### 3.2.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

#### 3.2.6.1. Desarrollo del robot CNC tipo cartesiano

El desarrollo del robot tiene las siguientes etapas:

##### a) Estructura mecánica:

Las primeras afinaciones se realizaron a la parte mecánica del robot, partiendo de un armado estructurado y ordenado (figura 18), revisando el ajuste de los tornillos y que no presente trabas

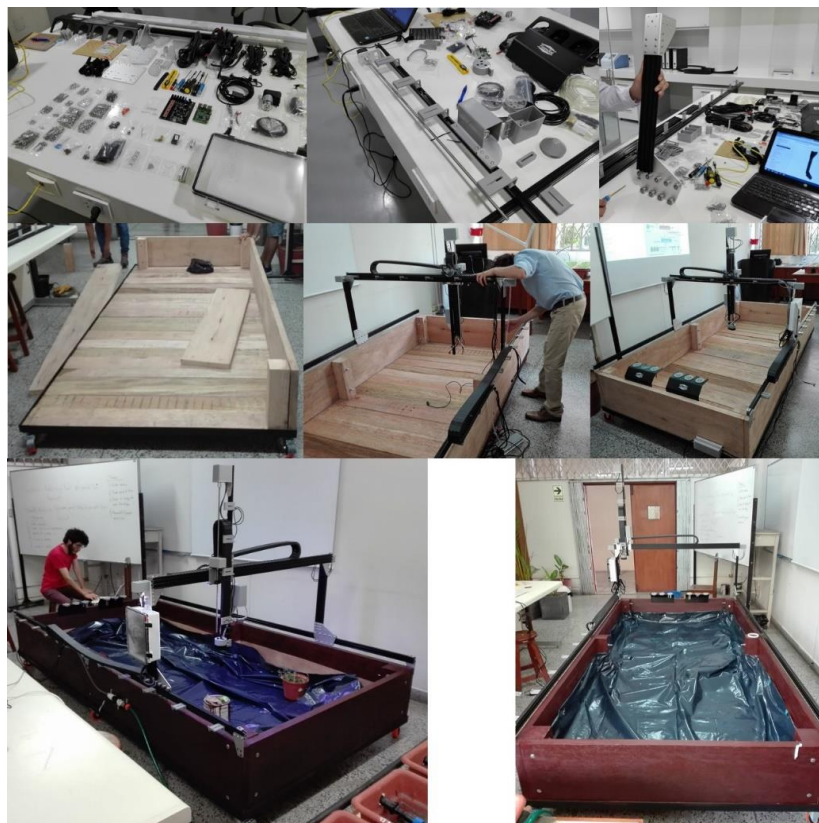


Figura 18. Proceso de armado de la estructura mecánica del robot  
Fuente: Fuente propia

en los cables, los pasos realizados son los establecidos por la empresa del robot, por lo que toda la información de armado está en su página web (Farmbot Inc., 2018). Bajo nuestras condiciones de trabajo se realizan ajustes en la plataforma sobre el que está montado el robot (Figura 12) y se tienen las siguientes consideraciones al momento de armar el robot:

- Ajuste en la linealidad de la estructura metálica del eje X, ya que si existe un desnivel el robot considera estos puntos como el tope de la estructura y la calibración se realiza incorrectamente.
- Ajuste en los tornillos especialmente de los platos que soportan el “gantry”, ya que cuando el robot realiza movimientos en el eje Z, este vibra y algunos tornillos comienzan a aflojarse, lo cual puede producir que el “gantry” se deslice hacia el eje X y comience a trabarse con las llantas, esforzando al motor y que no realice los movimientos correctamente
- Tener cuidado con el cableado ya que estos pueden interferir en el movimiento del robot en sus diferentes ejes de trabajo.

#### **b) Sistema Electrónico:**

El robot cuenta con los siguientes componentes electrónicos (tabla 2):

*Tabla 2: Descripción de los componentes principales del sistema electrónico del robot*

| Nombre          | Cantidad | Descripción   |
|-----------------|----------|---|
| Fuente de poder | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de alimentación universal de la marca WEHO, con grado de protección IP67 (protección contra polvo y agua)</li> <li>• Tensión de entrada: 110 – 220 V, 50 a 60 Hz</li> <li>• Voltaje de salida: 12 V, 12.5 A dividido en 2 canales.</li> </ul> |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cable de alimentación: dos cables negros de 4 hilos 16 AWG de 4 metros de largo con 4 clavijas para el Farmduino.</li> </ul>   |
| Farmduino  | 1  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarjeta electrónica que combina las funciones de un microcontrolador de un Arduino mega 2560 con una Shield RAMPS.</li> <li>• Microcontrolador: Atmega2560.</li> <li>• Tensión de alimentación: 12 V DC.</li> <li>• Corriente por pin I/O: 40 mA.</li> <li>• Corriente por salidas de 3.3 V: 50 mA.</li> </ul>   |
| Raspberry Pi 3.0                                 | 1  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Este es la computadora host del robot, es donde se ejecuta el sistema operativo. Se comunica con la aplicación web mediante Wifi o vía conexión ethernet y se comunica con el Farmduino mediante conexión USB.</li> <li>• CPU: 1.2Ghz procesador Quad Core Broadcom BCM2837 de 64-bit ARMv8.</li> <li>• RAM: 1 GB LPDDR2 (900 MHz).</li> <li>• WiFi: 2.4GHz 802.11n wireless, BCM43143 chip</li> <li>• Bluetooth: Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth low energy (BLE)</li> <li>• Ethernet: Built-in 10/100 Ethernet</li> <li>• USB: puertos 4x USB 2.0.</li> <li>• Almacenamiento: MicroSD</li> <li>• GPIO: 40-pin header</li> </ul> |
| Motores paso a paso NEMA 17 con encoder rotativo | (4)<br>2 – Eje X<br>1 – Eje Y<br>1 – Eje Z | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores usados para el movimiento del robot en los ejes X, Y, Z.</li> <li>• Resolución del motor: 200 pasos/revolución (1.8 grados/paso)</li> <li>• Voltaje: 12 V.</li> <li>• Consumo de corriente: 1.68 A max.</li> <li>• Resolución del enconder: 360 líneas/revolución.</li> </ul>  |

|                                |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| Drivers para los motores A4988 | 4 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estos controladores convierten las señales de paso y dirección del microcontrolador en impulsos eléctricos enviados a los motores paso a paso NEMA 17 para permitirles moverse.</li> <li>• Microstepping: full-step, half-step, 1/4-step, 1/8-step, and 1/16-step</li> <li>• Corriente de salida: 1.5 A por fase sin disipador</li> <li>• Protección: apagado térmico por sobrecalentamiento, contra corriente cruzada y bloqueo por baja tensión, cortocircuito.</li> </ul> |
|--------------------------------|---|---|

*Fuente:* (Farmbot Inc., 2018)

El orden de conexión también se encuentra en la página web del fabricante. Todos los movimientos del robot lo realizan a través de 4 motores paso a paso NEMA 17 de 200 pasos /revolución con encoders rotatorios de resolución 360 líneas/revolución, lo que permite movimientos de 0.2mm de resolución. Los encoders de cada motor son los encargados de enviar la información de los pasos que realizó el motor para que el firmware los traduzca en coordenadas cartesianas y sea mostrada por la aplicación web. Para realizar sus movimientos usa una velocidad lineal el cual es resultado de dos ecuaciones, (1) aplicada para los ejes Y y X, (2) es aplicada al eje Z ya que esta velocidad depende de la estructura del conductor de tornillo. Con el cambio de drivers realizados y la implementación de la ventilación, se puede trabajar de manera estable con un valor 800 mm/s en todos los ejes y aumentar hasta un valor de 1000 mm/s para trabajos o movimientos que necesiten más velocidad.

$$Vl(mm/s) = VM/RM \times \text{microstepping} \times TP \times TC \dots \text{(ec. 1)}$$

$$Vl(mm/s) = VM/RM \times \text{microstepping} \times CT \dots \text{(ec. 2)}$$

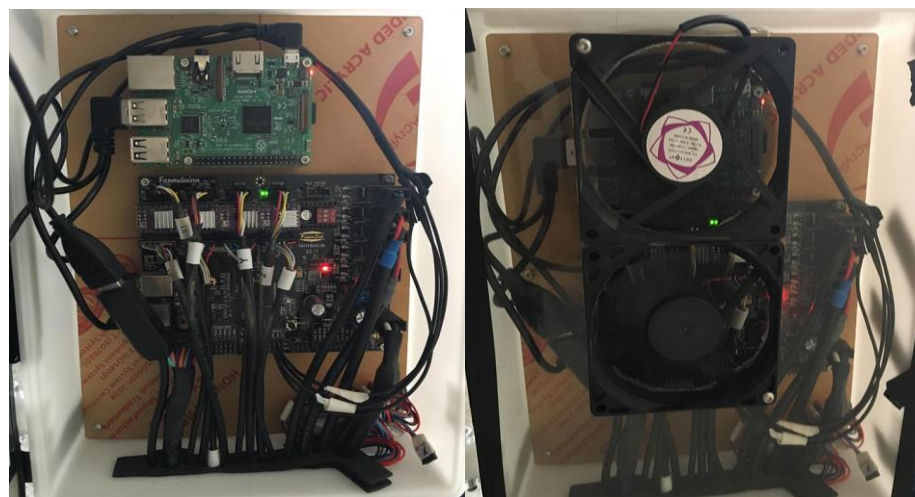
La velocidad lineal (Vl) en el caso de (1) depende de la velocidad del motor (VM) que nosotros demos en la configuración y

calibración del motor, microstepping del motor que es de 1 (full steps), el tamaño de la polea (TP) que es 20 dientes/revolución y el tamaño de la correa (TC) que es 2mm/diente. En tanto al eje Z funciona con los mismos valores anteriores, pero considerando el tamaño del conductor de tornillo (CT) que es de 8mm/revolución. Para un trabajo más exacto, también se puede ajustar los pasos por milímetro que realiza el motor, (3) nos muestra como hallar este valor en los ejes X y Y, (4) nos muestra el trabajo en el eje Z, para luego introducirlo a la configuración del motor:

$$PPM = ((RM \times \text{microstepping } x) / TP) / TC \dots (\text{ec. } 3)$$

$$PPM = (RM \times \text{microstepping } x) / CT \dots (\text{ec. } 4)$$

Basándonos en los valores anteriormente brindados podemos obtener un valor estándar de 5 pasos/mm en los ejes X y Y, para el eje Z se tiene el valor de 25 pasos/mm. El control realizado aún tiene varias deficiencias ya que al perder muchos pasos los motores por el trabajo realizado, este llega a detenerse por puntos o completamente en el trabajo, bloqueándose de manera automáticamente por software para luego ser enviado al operario del robot, actualmente se viene trabajando el mejorar el control realizado a los motores paso a paso. Durante las pruebas realizadas durante la puesta en marcha del robot, se observó que el driver del motor del eje Z se sobrecalentaba por lo que, después



*Figura 19. Sistema de ventilación del sistema electrónico*  
**Fuente:** Fuente propia

de un largo tiempo de trabajo, llegaba a perder precisión en el movimiento en el eje Z, por esta razón se implementó un sistema de ventilación (figura 19) junto con el cambio a un driver de mayor corriente. Mediante el cambio de un driver A4988 al driver DRV8825 y a través de la ecuación (5) de calibración de la corriente del driver, se configuro para que trabaje a una corriente  $I_{chop}$  de 1.7 A, para trabajar con esta corriente se calibra la resistencia con un multímetro a un valor de  $0.36\Omega$ .

$$I_{CHOP} = \frac{V_{XREF}}{5 * R_{ISENSE}} \quad \dots \text{(ec. 5)}$$

### c) Software de aplicación:

Mediante el uso del software de aplicación que se encuentra en la página de: <https://my.farmbot.io>, nosotros podemos acceder a toda la configuración del robot (figura 20). Primero debemos realizar nuestro registro en esta página, luego, realizamos una configuración que se encuentra detallada en la página del fabricante (Farmbot Inc., 2018) para poder establecer la conexión entre la página web y el robot mediante internet. El software de aplicación tiene 3 apartados de configuración, los cuales serán desarrollados específicamente al entorno de trabajo del robot, por lo que permite al robot ser adaptativo a cualquier cambio en su entorno de trabajo:

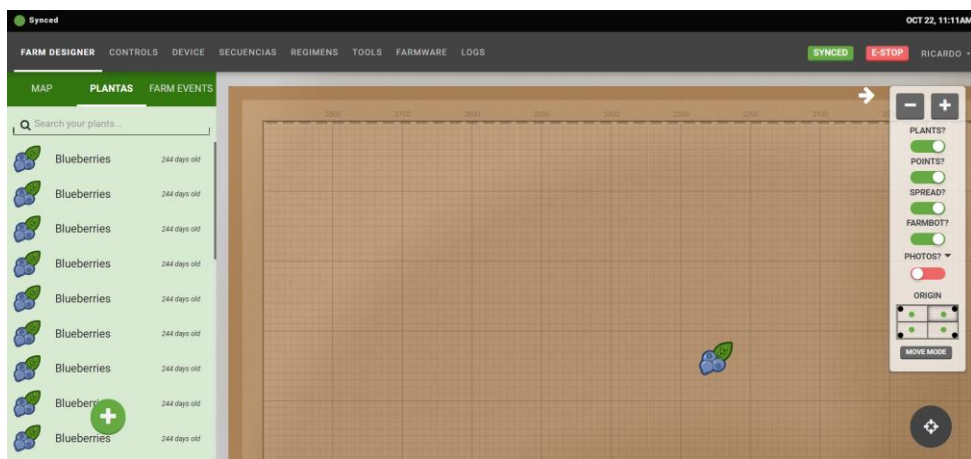


Figura 20. Entorno del software de aplicación.

Fuente: [myfarmbot.io](https://my.farmbot.io)

- Dispositivo (Device): En este apartado se configura todos los valores de funcionamiento del robot, dividido en las siguientes secciones: Calibración y determinación del punto “Home” que en nuestro caso es el punto cartesiano (0,0,0), Motores, encoders y fines de carrera, protección de pines y zona de peligro. Para la calibración del sistema configuramos los valores que se muestran en la siguiente tabla (tabla 3):

*Tabla 3: Prueba de valores en velocidades para la configuración de los motores*

| Valores                    |   | día1 | día2 | día3 | día4 | día5 | día6 | día7 | Prueba |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Velocidad homing (steps/s) | X | 500  | 400  | 300  | 200  | 150  | 150  | 100  | 1000   |
|                            | Y | 500  | 400  | 300  | 200  | 150  | 150  | 100  | 1000   |
|                            | Z | 500  | 400  | 300  | 200  | 150  | 150  | 100  | 1000   |
| Velocidad Máxima (steps/s) | X | 800  | 500  | 700  | 600  | 450  | 450  | 700  | 5000   |
|                            | Y | 800  | 500  | 700  | 600  | 450  | 450  | 700  | 5000   |
|                            | Z | 800  | 500  | 700  | 600  | 600  | 600  | 700  | 1000   |
| Velocidad Mínima (steps/s) | X | 500  | 300  | 200  | 100  | 50   | 90   | 400  | 800    |
|                            | Y | 500  | 300  | 200  | 100  | 50   | 90   | 400  | 800    |
|                            | Z | 500  | 300  | 200  | 100  | 50   | 90   | 400  | 800    |
| Aceleración (steps/s)      | X | 300  | 500  | 250  | 100  | 2    | 50   | 80   | 500    |
|                            | Y | 300  | 500  | 250  | 100  | 2    | 50   | 80   | 500    |
|                            | Z | 300  | 500  | 250  | 200  | 10   | 100  | 80   | 500    |
| Funcionamiento             |   | F    | F    | C    | C    | C    | C    | C    | C      |

*Prueba de los valores para establecer un correcto funcionamiento del robot. Leyenda **F**: Fallo de funcionamiento; **C**: Correcto funcionamiento; **números**: Valores con los que falla durante la ubicación del robot en la posición Home; **números**: Valores con los que falla durante todo el proceso; **números**: Valores en que la estructura metálica vibra. En la columna Prueba se encuentran valores usados después de establecer un planeamiento de trayectoria del robot.*

*Fuente: Fuente propia*



- Herramientas (Tools): En este apartado se encuentra la ubicación de los puntos fijos en coordenadas cartesianas, ya sea de las herramientas de trabajo o ubicaciones de bandejas de plantines, los valores con lo que se trabajó (figura 21) fueron medidos de manera manual y muestran nuestro entorno de trabajo.

| TOOLBAY 1 |     |      |      |                 |
|-----------|-----|------|------|-----------------|
| SLOT      | X   | Y    | Z    | TOOL            |
| 1         | 16  | 355  | -402 | Seed Injector   |
| 2         | 16  | 454  | -402 | Watering Nozzle |
| 3         | 16  | 553  | -402 | Weeder          |
| 4         | 16  | 799  | -402 | Soil Sensor     |
| 5         | 0   | 889  | -335 | Seed Tray       |
| 6         | 0   | 889  | -235 | Pre - seed tray |
| 7         | 425 | 205  | -320 | TC_P0           |
| 8         | 11  | 995  | -335 | Seed Tray 2_B2  |
| 9         | 11  | 1007 | -335 | Seed Tray 2_B3  |
| 10        | 11  | 1019 | -335 | Seed Tray 2_B4  |

| TOOLS           |          | EDITAR |
|-----------------|----------|--------|
| TOOL NAME       | STATUS   |        |
| Seed Injector   | active   |        |
| Soil Sensor     | active   |        |
| Weeder          | active   |        |
| Seed Tray       | active   |        |
| Seed Bin        | inactive |        |
| Watering Nozzle | active   |        |
| Pre - seed tray | active   |        |
| TC_P0           | active   |        |
| Seed Tray 2_B3  | active   |        |
| Seed Tray 2_B4  | active   |        |
| Seed Tray 2_B2  | active   |        |

*Figura 21. Ubicación de las coordenadas de las herramientas, así como el punto inicial de la bandeja de trabajo “TC\_P0”*  
**Fuente:** Fuente propia.

- Secuencias: En este apartado se encuentra los comandos del software que permiten diseñar programas aplicativos para el robot, son bastante estándares pudiendo con ellos implementar lógicas condicionales, bucles, lectura y escritura de periféricos, espera de señales digitales y analógicas, definir el tipo de coordenada cartesiana asignada a una localización determinada (figura 22), por ejemplo, si es coordenada



*Figura 22. Lista de comandos de programación para el planeamiento de trayectoria del robot, junto con el color de cada comando*

*Fuente: fuente propia.*

absoluta o relativa. Las coordenadas absolutas obligan al robot a pasar por ellas de forma exacta y es útil para asignar posiciones de herramientas de trabajo, plantas y generar trayectorias en entornos con alto riesgo de colisión. También se puede aplicar un offset en cada dirección (X, Y, Z) de las coordenadas absolutas facilitando con ello el desarrollo de programas donde se requiere definir posiciones en forma de matriz, muy común en entornos agrícolas o viveros industriales. Las coordenadas relativas se definen en base a un sistema de referencia previo, es decir uno determina la cantidad de movimiento en cada dirección y por defecto coge las direcciones del último sistema de referencia previamente definido. Requieren menos tiempo computacional y son adecuados para generar trayectorias robot en entornos poco probables de colisión.

Para el planeamiento de trayectoria del robot, se desarrolla un diagrama de flujo general usando estos comandos, que presenta las siguientes desventajas:

- No se pueden realizar saltos entre líneas de programación.

- Se genera una programación extensa, pero puede disminuirse usando el comando “Ejecutar secuencia”, el cual almacena una serie de pasos recurrentes en el cuerpo del programa.

El diagrama de flujo general (figura 23) muestra un proceso dividido en diferentes etapas (Proceso 1,2, n) que en general desarrolla un trabajo dentro de un vivero industrial. Presenta las siguientes características:

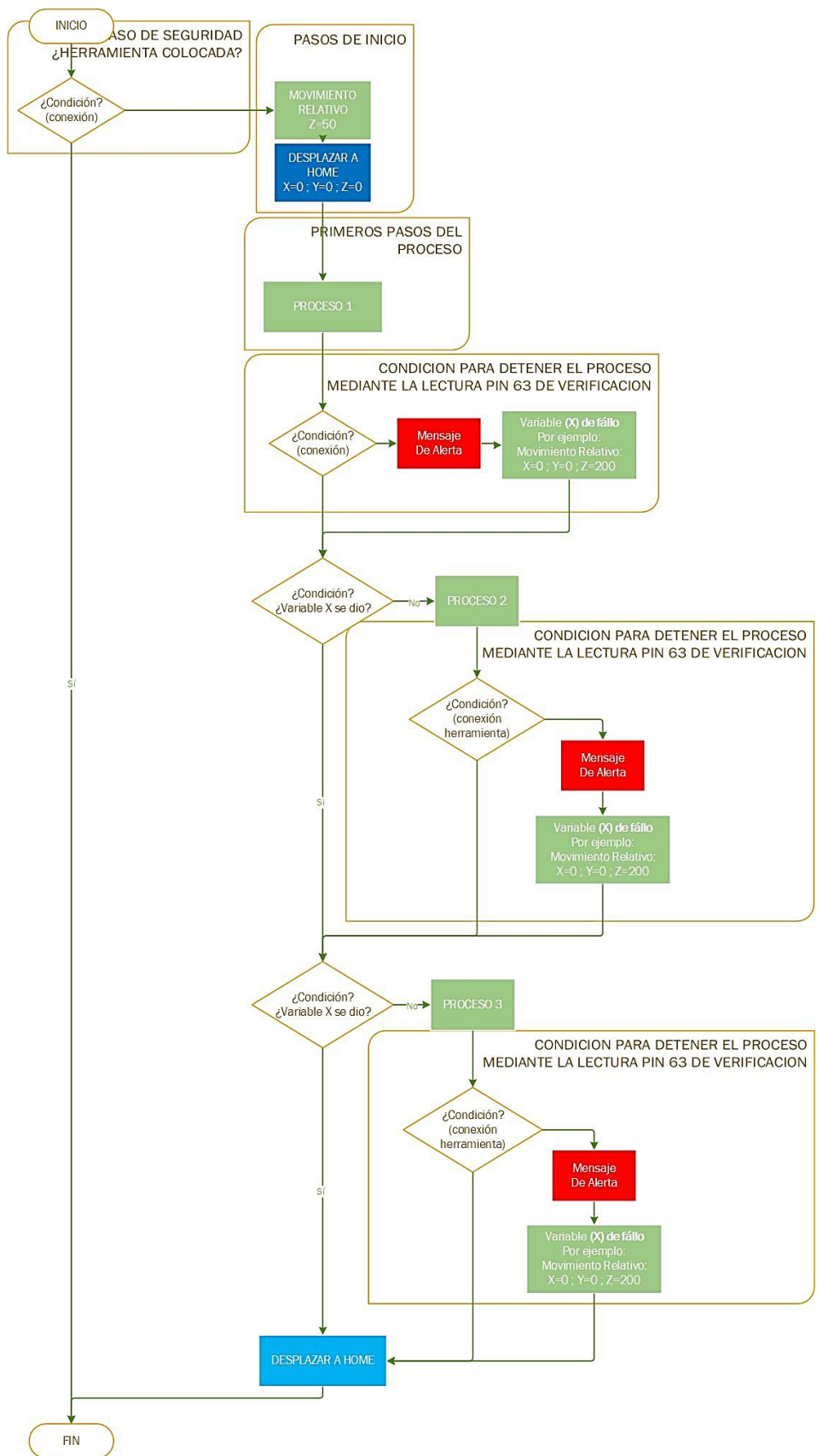


Figura 23. Diagrama de flujo general,  
Fuente: fuente propia.

- Todo proceso inicia con la verificación por si existe alguna herramienta puesta en el robot, en el caso de que existiera esta herramienta el proceso termina, enviando un mensaje de alerta para retirar la herramienta, en caso contrario continua con la siguiente parte del proceso.
- Inicia con un movimiento en el eje Z, para evitar cualquier colisión del UTM cuando este se dirija a la siguiente ubicación. Se recomienda que todo proceso inicie en el punto home para mantener un funcionamiento correcto.
- Todo el trabajo está dividido en proceso (proceso 1, proceso 2 y proceso 3, este número de procesos depende de cada trabajo). Se ejecuta la primera parte del proceso, al culminar, pasa a una verificación de seguridad para continuar con el trabajo. Este paso de seguridad consiste en la verificación de que si la herramienta se encuentra puesta en el UTM o no, mediante un comando de condición que compara el valor medido en el pin de verificación (pin63) con el valor que deseamos medir, siendo 0 conectado y 1 desconectado, para luego realizar un movimiento en eje Z = 200 mm que indicará que ocurrió un fallo, esta variable es denominada “variable de fallo”, el cual será comparada durante todo el proceso para determinar la existencia de un fallo (dependiendo el proceso, se establece que 1 o 0 sea la condición de fallo) .
- En el caso de que el proceso fallará, el robot se dirigirá a la ubicación de home para terminar así con el trabajo.
- En caso de que no existiera ningún fallo, continua con el proceso. Al terminar el siguiente paso, se realizará una comparación de la variable de fallo, siendo esta variable la posición del eje Z, si el valor medido es  $<-250$  mm, significa que no existió la variable de fallo continuando con el proceso, en caso contrario, se establecerá que ocurrió un fallo, llevando al robot a home y terminando el proceso.

- Este procedimiento se repite durante todo el trabajo del robot, iniciando con los pasos que requiera el proceso, para luego realizar el paso de seguridad, estableciendo así, si la variable de fallo existió para terminar el proceso, o no existió para continuar con el proceso.
- Cada proceso trabaja con una herramienta, por lo que se estableció dos secuencias: 1) secuencia de cogida: contiene dos posiciones de trabajo, una que se encuentra a 10 cm. de la herramienta en el eje Z, donde se detiene el robot y baja su velocidad a un 60% hasta coger la herramienta y luego se dirige a otro punto que está a 10 cm. en el eje X para retirar la herramienta de la bandeja, manteniendo su velocidad al 60%, luego realiza su siguiente movimiento con una velocidad estándar del 100%.) secuencia de dejada: contiene los dos posiciones antes mencionadas, solo que en este caso se realizan de forma inversa, primero un movimiento en el eje X y luego en el eje Z con una velocidad de 60%, para dejar la herramienta en la bandeja y luego se dirige a la siguiente ubicación con su velocidad estándar de 100%.

Este esquema general se puede adecuar para cualquier proceso que requiera realizar el robot. La puesta en marcha del robot fue diseñada bajo este mismo diagrama de flujo, el cual presenta el funcionamiento ya mencionado anteriormente y tuvo 3 meses de funcionamiento para así establecer un trabajo continuo y sin fallas del robot (gráfico 1).

La estructura de la programación realizado durante 3 meses está detallada en el Anexo 01 y durante este tiempo, se recolecto los datos de fallas de funcionamiento detalladas en el Anexo 02.

El seguimiento realizado al funcionamiento del robot, bajo la programación establecida, presento diferentes tipos de fallas, cada una relacionado a un aspecto diferente del robot (Gráfico 2):

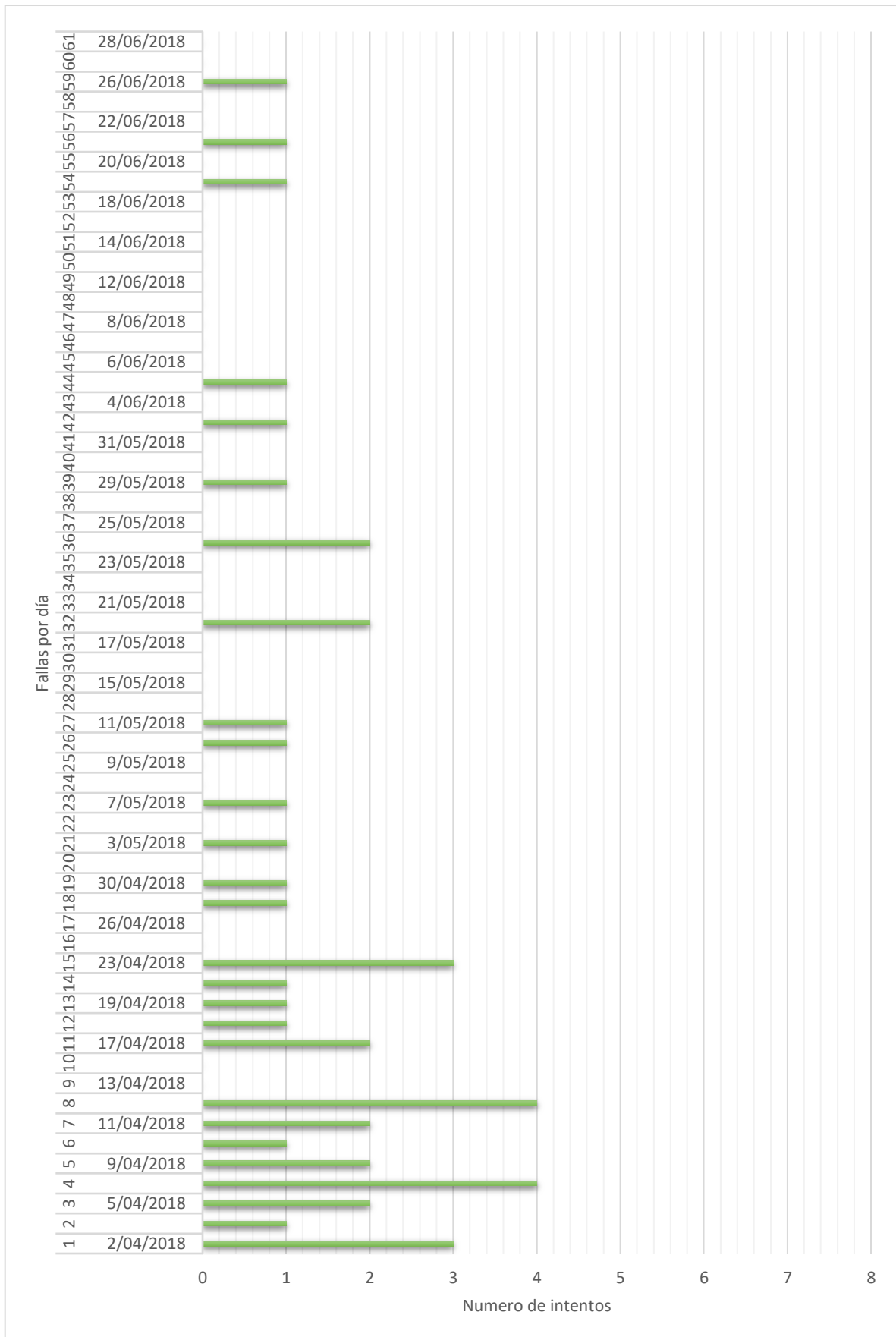


Gráfico 1: Numero de fallas por día, por un periodo de 3 meses  
Fuente: Fuente propia

FP: falla de precisión, relacionado al calentamiento de los drivers y a la primera versión de la programación de la trayectoria del robot; FS, Fci: fallas de servidor y de conexión a internet, relacionado al tipo de acceso proporcionado al laboratorio y el segundo tipo de falla relacionado al servidor de la página de configuración del robot, la cual cada cierto tiempo proporciona una actualización del sistema el cual propone errores nuevos al sistema.

#### d) Visión Artificial:

La configuración y calibración de la cámara se realiza en el apartado del Firmware (Figura 24), donde dependiendo del lugar de trabajo y el tipo de plantas que se esté trabajando, se establece los siguientes valores para etapa:

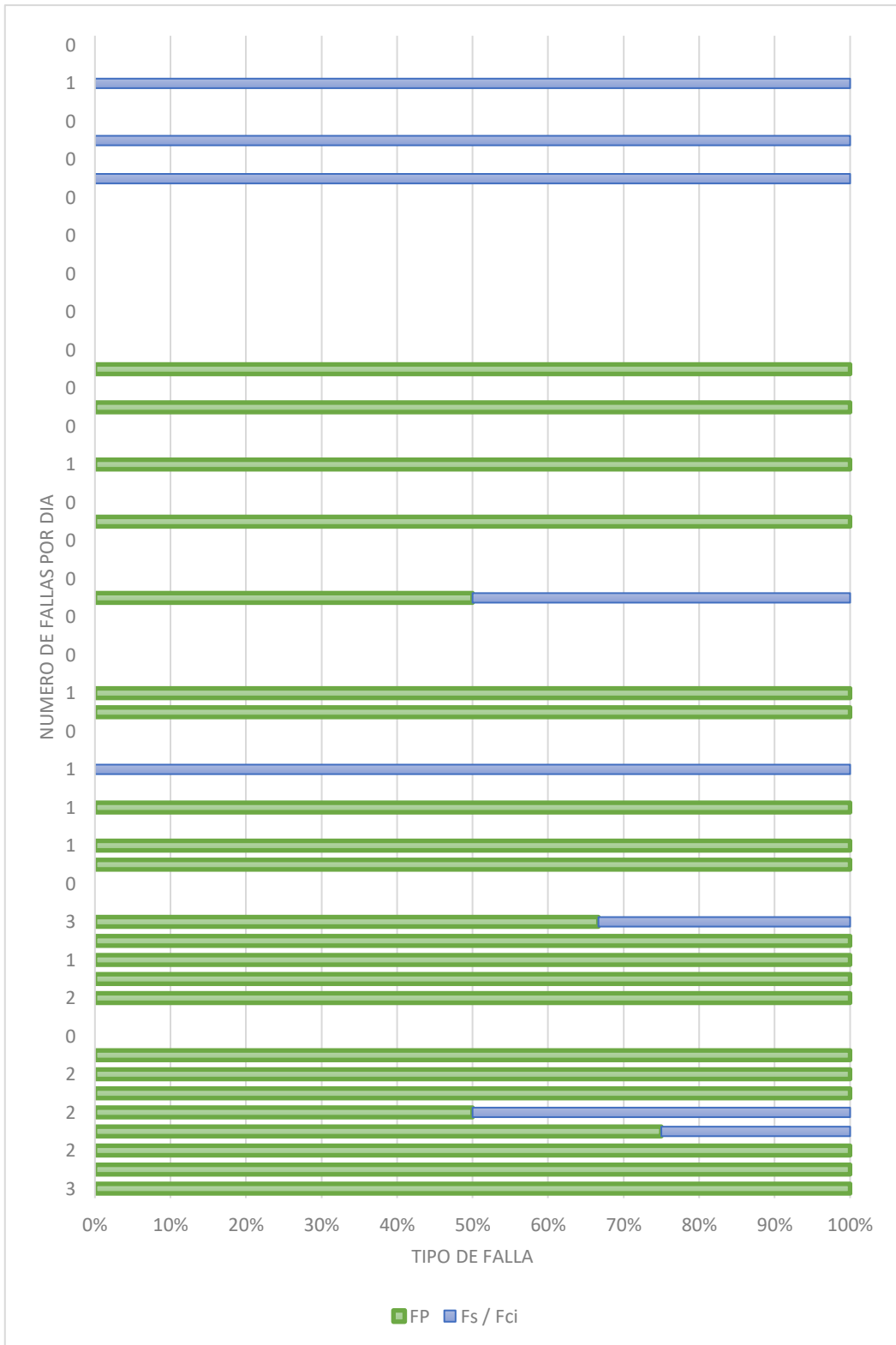
Calibración de la cámara: se colocan dos objetos del color definido, en nuestro caso de color naranja, por lo que el rango de valores de hue, saturation y value, son los mostrados en la figura 25. Estos valores pueden variar dependiendo al entorno y a los colores permitidos en este rango, para que cuando se realice la calibración, este solo reconozca los dos objetos puestos sobre la mesa de trabajo, a 10 cm de distancia una de otra en el eje X.

Para la detección hierba, se trabaja sobre un entorno similar al anterior paso (Figura 26). Los valores de hue, saturation y value definen el color de la planta sobre la cual trabajaremos, en nuestro caso son los colores permitidos para plantines de alcachofa.



Figura 24. Apartado de Firmware donde se desarrolla el procesamiento de imágenes y datos  
**Fuente:** Fuente propia.





*Gráfico 2: Tipo de falla por día, FP: Falla de precisión relacionado a la pérdida de pasos por los motores. Fs/Fci: Falla del servidor o de conexión a internet relacionado al punto de acceso.  
Fuente: Fuente propia*

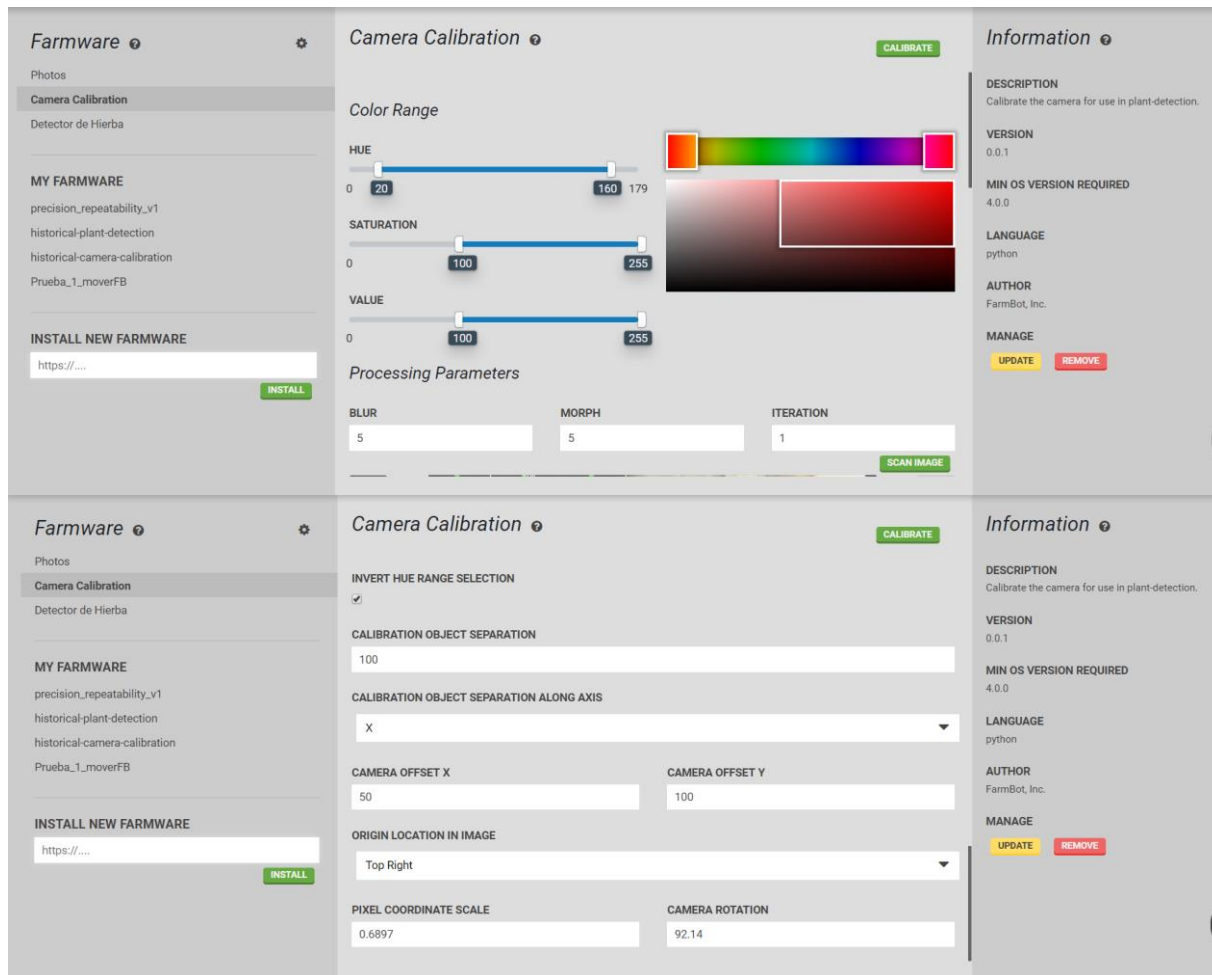


Figura 25. Calibración de la cámara para trabajos sobre bandejas de plantines.  
Fuente: Fuente propia.

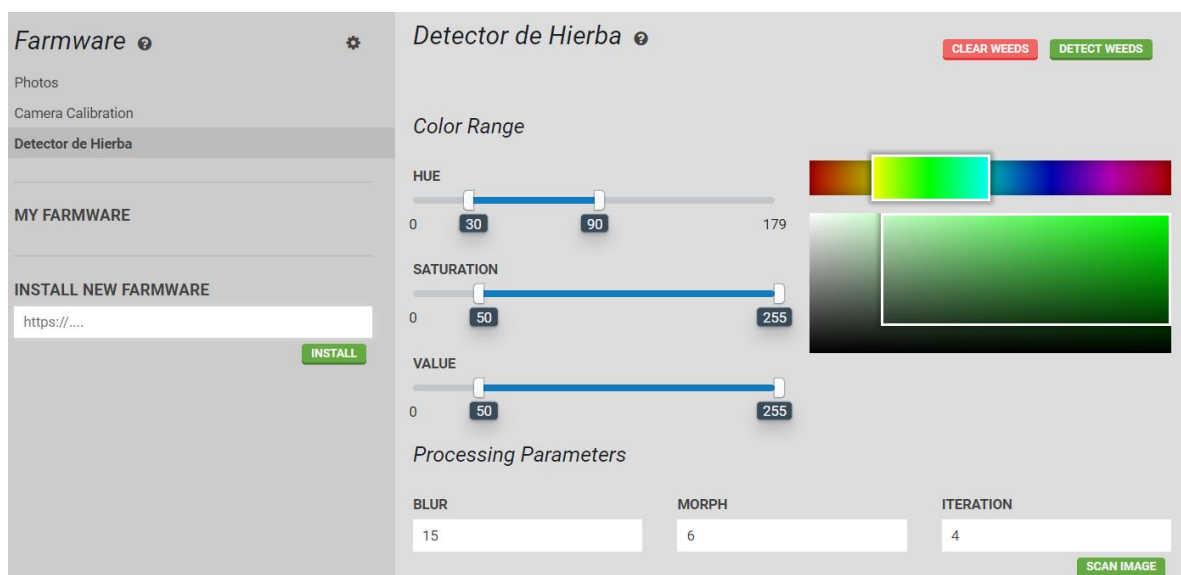


Figura 26. Detector de hierba, aplicado para control de calidad en plantines de alchofa.  
Fuente: Fuente propia.

Para trabajos sobre control de calidad, necesitaremos determinar el área foliar el cual está relacionado al área que forman las hojas de planta, para esto necesitaremos calibrar los valores de BLUR: difumina la imagen mediante un filtro de mediana que fuerza a los puntos de intensidad muy distintos, a tener valores más cercanos a sus vecinos; MORPH: realiza transformaciones morfológicas avanzadas utilizando erosión y dilatación como operaciones básicas; ITERATION: número de veces que se aplican erosión y dilatación.

Estos valores fueron aplicados mediante un script desarrollado en python para determinar que valores eran los más adecuados para los plantines de alcachofa (figura 27).

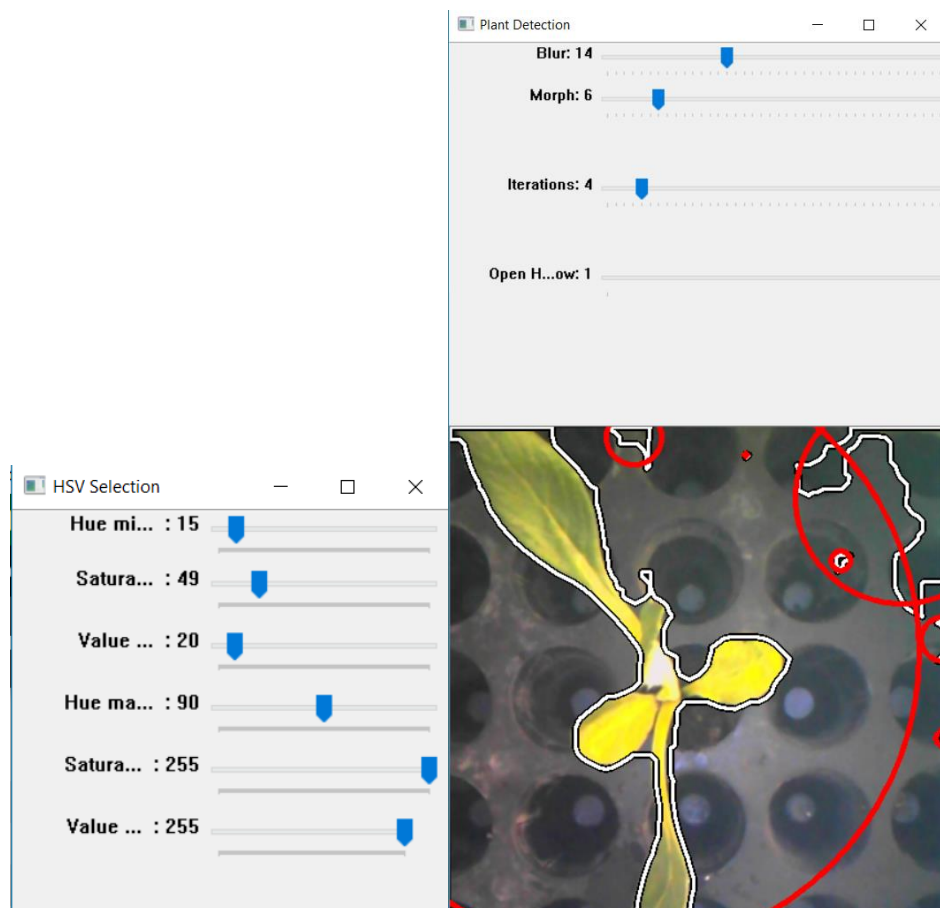


Figura 27. Prueba de valores aplicado a plantines de alcachofa.  
**Fuente:** Fuente propia.

### 3.2.6.2. Algoritmos de procesamiento de imágenes.

El robot posee una cámara baroscópica el cual le permite tomar fotos en ubicaciones que nosotros establecemos necesarios, para luego realizar diferentes algoritmos de procesamiento de imágenes sobre las fotos y obtener información necesaria para nuestros propósitos. Para desarrollar nuestras propias aplicaciones debemos entender el flujo de información que ocurre durante el proceso que realiza sobre la detección de plantas implementada en el robot, todo esto desarrollada en el apartado de FIRMWARE de la aplicación web.

#### a) Flujo de información

Para entender cómo se desarrolla el flujo de información, en este sistema robótico el cual comprende diferentes tipos de tecnologías, tanto informáticas como de electrónica y diferentes lenguajes de programación (C++, Ruby, Elixir, TypeScript y Python), partiremos de la estructura del sistema operativo del robot (figura 28). El OS del Farmbot, está basado en una plataforma de desarrollo Nerves, el cual está programado en el lenguaje Elixir para sistemas embebidos y desarrollado en Ubuntu LTS. Esta plataforma reduce la velocidad de arranque del sistema al trabajar con aplicaciones de muy pequeño tamaño y que puede realizar actualizaciones del sistema a través de internet.

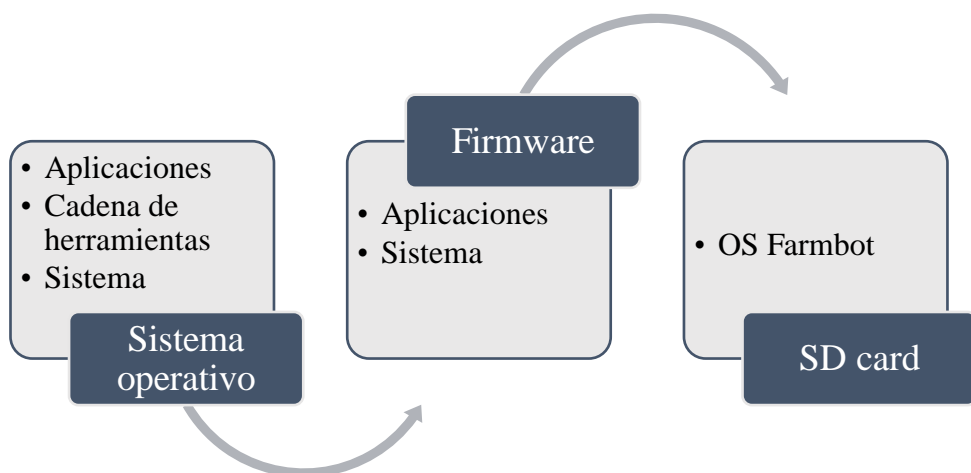


Figura 28. Estructura de desarrollo del sistema operativo del farmbot  
**Fuente:** Fuente propia.

Este sistema operativo está instalado en el Raspberry Pi 3 el cual cumple una función importante dentro del flujo de información entre el Farnduino, Servidor web y la aplicación web (figura 29).

El robot tiene muchos componentes en software, por lo que, para realizar el intercambio de datos entre sistemas, desarrollaron un proceso de llamado remoto (RPC – Remote Procedure Call) llamado CeleryScript, por el cual se ejecutan procesos (subrutinas) en un espacio de una dirección distinta, usualmente es otra computadora, pero en nuestro caso, es el servidor del robot.

Este proceso cuenta con diferentes nodos, los cuales realizan diferentes tareas del funcionamiento del robot, que permite establecer los diferentes trabajos del robot dentro de un vivero industrial, así como el procesamiento de imágenes. El formato para estos documentos es JSON, que es un formato de texto ligero para el intercambio de datos. Farmbot usa estos nodos para diferentes casos de almacenamiento, comunicación y también como el lenguaje interno usado en el apartado de secuencias,

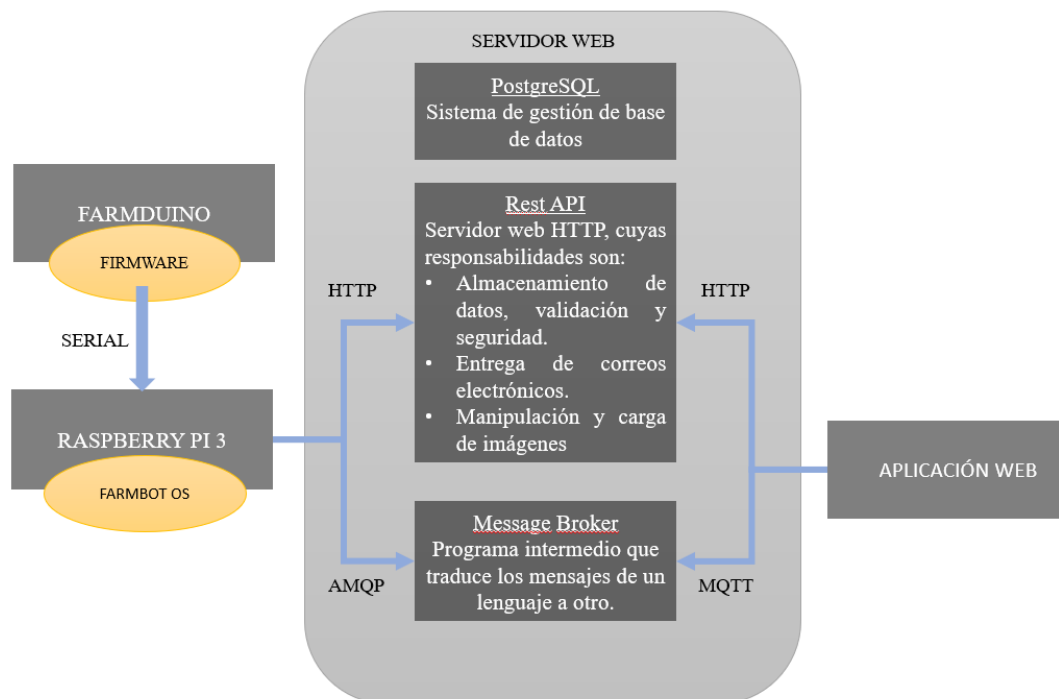


Figura 29. Flujo de información del robot a través de los diferentes sistemas.

**Fuente:** Fuente propia.

donde se encuentra los diferentes comandos de programación para la secuencia de trayectoria del robot. CeleryScript es usado para los siguientes procesos:

- Para construir un árbol de sintaxis abstracta, para el editor de secuencias.
- Para el envío de mensajes entre el usuario y los dispositivos a través de MQTT.
- Para desarrollar Firmwares, complementos desarrollados por otras personas, para comunicarse con el farmbot y su funcionalidad interna, como cambio la configuración del dispositivo en marcha y activar sus actualizaciones del firmware.

#### b) Desarrollo de Firmware

Para desarrollar algoritmos en procesamiento de imágenes, aplicado al control de calidad de plantines, se tiene que desarrollar Firmwares que nos permiten implementar nuestros algoritmos sobre el robot. Estos algoritmos deben ser realizados en el lenguaje de programación Python y deben seguir el siguiente proceso (figura 30):

Como primer punto debemos realizar nuestra programación en Python, bajo las siguientes características:



Figura 30. Esquema de desarrollo en nuevas aplicaciones del robot.

**Fuente:** Fuente propia.

- Debemos importar lo módulos de procesamiento de imágenes:

```

from plant_detection.
"""Modulo completo para la detección de plantass"""
from plant_detection.Parameters import Parameters
"""Manejo de los parámetros de entrada"""
from plant_detection.DB import DB
"""Manejo de los datos de la planta"""
from plant_detection.image import image
"""procesamiento de imagenes"""
from CeleryPy import log
"""enviar mensajes a través del Log (barra superior de la
aplicación web)"""
from CeleryPy import move_absolute
"""para realizar el comando de movimiento absoluto,
tambien se puede agregar otros comandos del apartado
de secuencias"""
import cv2
"""para acceder a las librerias del OpenCv"""

```

- Luego, debemos desarrollar el cuerpo de nuestro proceso usando las librerías de OpenCV junto con comandos de movimiento y así establecer nuestro trabajo (Figura 31).

Después de tener nuestra programación en Python, debemos realizar nuestro registro en la página de GitHub que es una plataforma de desarrollo colaborativo, bajo las siguientes características:

- Agregar los archivos de “API.py” y “CeleryPy.py”.
- Agregar nuestro programa principal “Programa\_X.py”
- Agregar un archivo “README.md” donde realizamos una pequeña descripción del proceso que estamos realizando.
- Agregar el elemento principal, que es un archivo “manifest.json” el cual posee una dirección URL para su instalación en el Firmware y tiene la siguiente forma (figura 32).

```

def find(self, calibration=False, safe_remove=False,
        draw_contours=True):
    contours = self._find_contours(calibration)
    valid_contours = []
    self.plant_db.pixel_locations = []
    only_one_object = False
    for i, cnt in enumerate(contours):
        # Calculate plant location by using centroid of contour
        moment = cv2.moments(cnt)
        try:
            cnt_center_x = int(moment['m10'] / moment['m00'])
            cnt_center_y = int(moment['m01'] / moment['m00'])
            (cir_center_x,
             cir_center_y), radius = cv2.minEnclosingCircle(cnt)
        except ZeroDivisionError:
            continue
        else:
            if cv2.contourArea(cnt) > 1:
                valid_contours.append(cnt)
            else:
                continue

    self._draw_contour(cnt, calibration, draw_contours)

    if calibration and i < 2:
        # Mark calibration object with blue circle
        center = (int(cir_center_x), int(cir_center_y))
        cv2.circle(
            self.images['marked'], center, int(radius), (255, 0, 0), 4)

    self.plant_db.pixel_locations.append(
        [cnt_center_x, cnt_center_y, radius])
    if calibration:
        only_one_object = self._save_calibration_contour(
            i, only_one_object,
            location=[cir_center_x, cir_center_y, radius])

    if calibration and only_one_object:
        self.plant_db.calibration_pixel_locations = [
            self.plant_db.calibration_pixel_locations]
        self.plant_db.object_count = 1
    if not safe_remove:
        self.images['current'] = self.images['contoured']
        self.plant_db.object_count = len(valid_contours)

```

*Figura 31. Estructura del cuerpo del programa para la detección del contorno de una planta.*

**Fuente:** FarmBot-Labs/plant-detection.



```
14 lines (13 sloc) | 512 Bytes Raw Bla
1 {
2   "package": "Prueba_1_moverFB",
3   "language": "python",
4   "author": "Carlos J. Choque Moscoso",
5   "description": "Probar movimiento FB media python",
6   "version": "0.0.1",
7   "farmware_tools_version": "v0.2.2",
8   "min_os_version_majior": 3,
9   "url": "https://raw.githubusercontent.com/DarkCarlos/Farmwares_FB/master/Prueba_1_moverFB/manifest.json",
10  "zip": "https://github.com/DarkCarlos/Farmwares_FB/archive/master.zip",
11  "executable": "python",
12  "args": ["Farmwares_FB-master/Prueba_1_moverFB/Prueba_1_moverFB.py"]
13 }
```

Figura 32. Estructura del archivo manifest.json, para la instalación de nuestro programa en el robot.

**Fuente:** Fuente propia.

Luego de estar subido nuestro programa a la página de GitHub, debemos entrar a nuestra cuenta el my.farmbot.io para la instalación de nuestro programa, para esto debemos entrar en el apartado de Farmware y mediante el URL creado en el archivo manifest.json, procedemos a copiar esta URL (Figura 33) y luego le damos a instalar, terminando así el proceso de instalación.

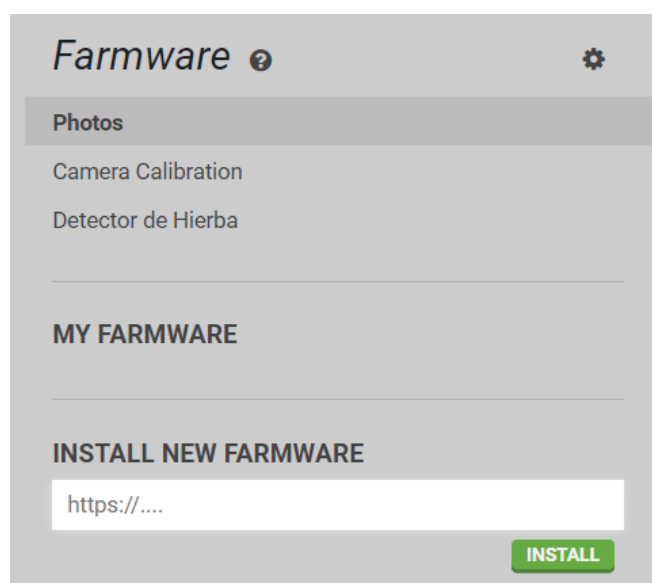


Figura 33. Lugar de instalación de nuestro programa a través del Farmware.

**Fuente:** Fuente propia.

Mediante el uso de las librerías que existen en OpenCV podemos realizar aplicaciones para el control de calidad de plantines de alcachofa, para ellos nos basaremos en el área foliar de los plantines, la cual está relacionada con el área que rodea a todas sus hojas y mediante la librería de “minEnclosingCircle()” determinamos los valores de los radio de cada planta, por lo que aquellas plantas que que no crecieron correctamente tendrán valores inferiores a los demás y de acuerdo a sus coordenadas en el lugar de trabajo, podremos saber que plantas no crecieron correctamente (Figura 34).

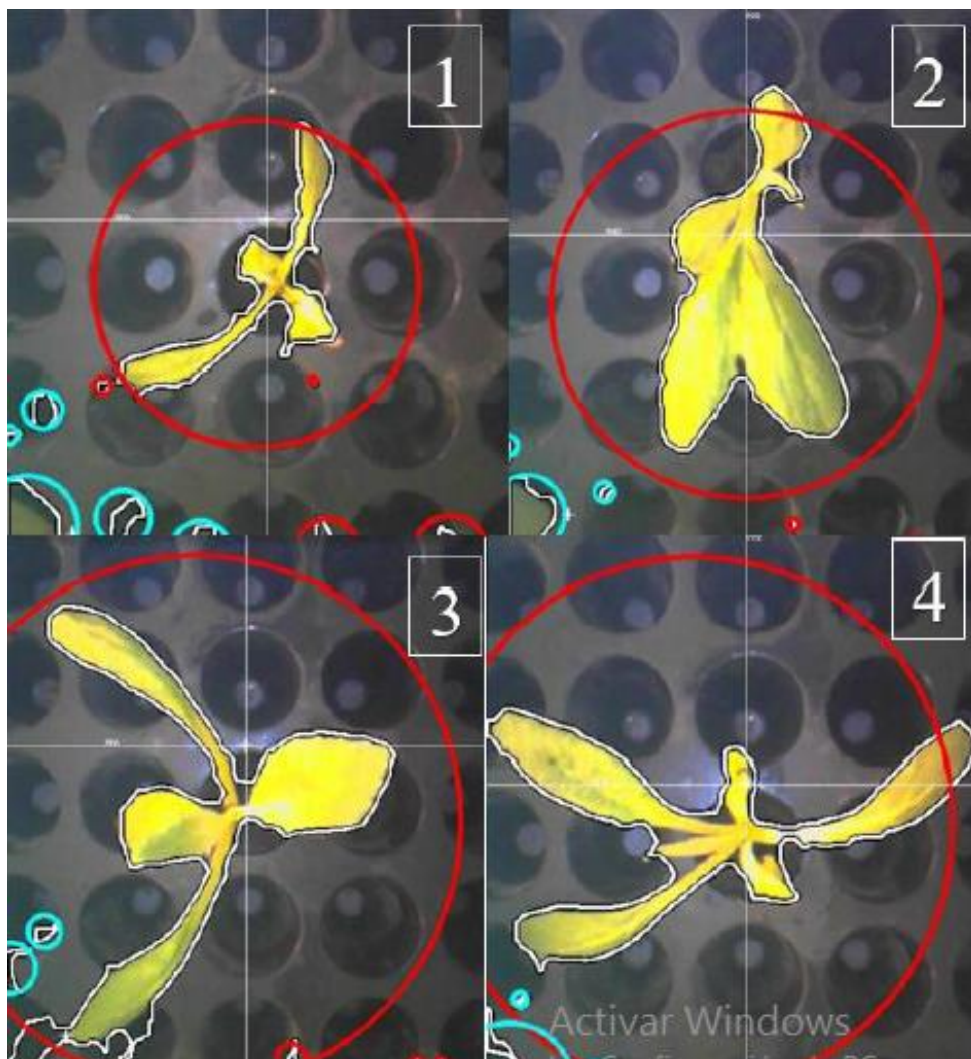


Figura 34. Control de calidad y crecimiento de plantines de alcachofa. Durante 10 días.  
**Fuente:** Fuente propia.

Los valores para el control de buena calidad vienen relacionada a las alturas y cuyos valores fueron obtenidos de la empresa Agronegocios Genesis (Tabla 4). Cabe destacar que los valores y alturas de un producto de buena calidad en plantines de alcachofa son valores no estándares, ya que la manera de calificación proviene del personal con experiencia en esta área y al ser escasa, no establece valores uniformes ni generales para este tipo de plantas.

| # Cono | Variedad  | Fecha de siembra | Bandejas sembradas | Conteo al azar bandejas por siembra | Altura de plantas (cm) |     |      |      |      |      |
|--------|-----------|------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------|-----|------|------|------|------|
|        |           |                  |                    |                                     | 20                     | 22  | 24   | 26   | 28   | 30   |
| 72     | imp. Star | 9-Abr-18         | 2220               | 20                                  | 7.3                    | 8.9 | 10.6 | 12.2 | 13.9 | 15.4 |
| 72     | imp. Star | 10-Abr-18        | 1500               | 20                                  | 6.5                    | 8.1 | 9.8  | 11.4 | 13.2 | 14.7 |
| 72     | imp. Star | 11-Abr-18        | 1350               | 20                                  | 7.4                    | 9   | 10.7 | 12.3 | 14.1 | 15.6 |
| 72     | imp. Star | 11-Abr-18        | 1300               | 20                                  | 6.4                    | 8   | 9.7  | 11.4 | 13.1 | 14.6 |
| 72     | imp. Star | 12-Abr-18        | 1200               | 20                                  | 6.9                    | 8.5 | 10.2 | 11.8 | 13.5 | 15.1 |
| 72     | imp. Star | 13-Abr-18        | 1600               | 20                                  | 7.1                    | 8.7 | 10.4 | 12   | 13.7 | 15.3 |
| 72     | imp. Star | 13-Abr-18        | 1700               | 20                                  | 7.6                    | 9.2 | 10.9 | 12.5 | 14.2 | 15.8 |
| 72     | imp. Star | 13-Abr-18        | 2100               | 20                                  | 7.8                    | 9.4 | 11.1 | 12.7 | 14.4 | 16   |
| 72     | imp. Star | 13-Abr-18        | 2300               | 20                                  | 7.3                    | 8.9 | 10.6 | 12.2 | 13.9 | 15.5 |

Tabla 4: Valores de las alturas de las plantas durante 10 días de crecimiento  
Fuente: Agronegocios Génesis

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Características del robot.

De acuerdo con la investigación realizada sobre el funcionamiento del robot, se establece las siguientes ventajas y desventajas de cada una de las etapas, estructura mecánica, sistema electrónico, software de aplicación y sistema de visión artificial.

| Etapa               | Ventajas   | Desventajas   |
|---------------------|--|---|
| Estructura metálica | <ul style="list-style-type: none"><li>• Perfiles de aluminio que permite movimientos suaves y una mínima fricción.</li><li>• Sistema de transmisión mediante correas no requiere mantenimiento continuo</li><li>• Estructura del tipo cartesiano, permite adaptabilidad en el trabajo con plantas (alturas, área foliar, ubicación, etc)</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Presenta fallos de calibración en los ejes, en caso de existir desnivel.</li></ul>                              |
| Sistema Electrónico | <ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema operativo instalado en el Raspberry Pi basado en nerves, permite realizar actualizaciones y modificaciones mediante una tarjeta micro USB o mediante la página web.</li><li>• La placa de control, Farmduino, permite aumentar periféricos de 12 V y 5 V, de fácil acceso por programación y página web.</li><li>• UTM, posee varios pines de configuración y alimentación en 5 voltios, permitiendo diseñar e implementar nuevos sensores de trabajos</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• No permite el trabajo con herramientas de peso muy alto en el UTM, por el acople magnético que posee.</li></ul> |

|                               |   |  |
|-------------------------------|---|--|
| <p>Software de aplicación</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posee una interfaz gráfica amigable para el usuario.</li> <li>• Permite una calibración completa del robot, tanto en los ejes X, Y, Z, lo que le permite la adaptabilidad a nuevos entornos.</li> <li>• Permite una configuración completa del equipo: velocidades, aceleraciones, medición de pasos, trabajos como la ubicación de Home y configuración de los encoders de los motores.</li> <li>• Permite implementar nuevos algoritmos de trabajos mediante la instalación de nuevas aplicaciones subidas al GitHub.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El funcionamiento del software, depende del correcto funcionamiento del servidor como del tipo de conexión de internet que tengamos.</li> </ul> |
| <p>Visión artificial</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite el desarrollo de nuevos algoritmos de procesamiento de imágenes aplicada al control de calidad, crecimiento y salud de plantines, tomadas por el robot</li> <li>• El resultado del análisis de imágenes permite tener acciones del robot sobre el área de trabajo, acciones que han sido programadas por nosotros.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja calidad de imagen.</li> <li>• Solo permite tomar imágenes de la parte superior de las plantas.</li> </ul>                                  |

#### 4.2. Configuración y calibración del robot.

Bajos las condiciones establecidas en velocidades y aceleraciones desarrolladas en este proyecto, se determina que los parámetros para un correcto funcionamiento deben estar entre los varales de la tabla 5.

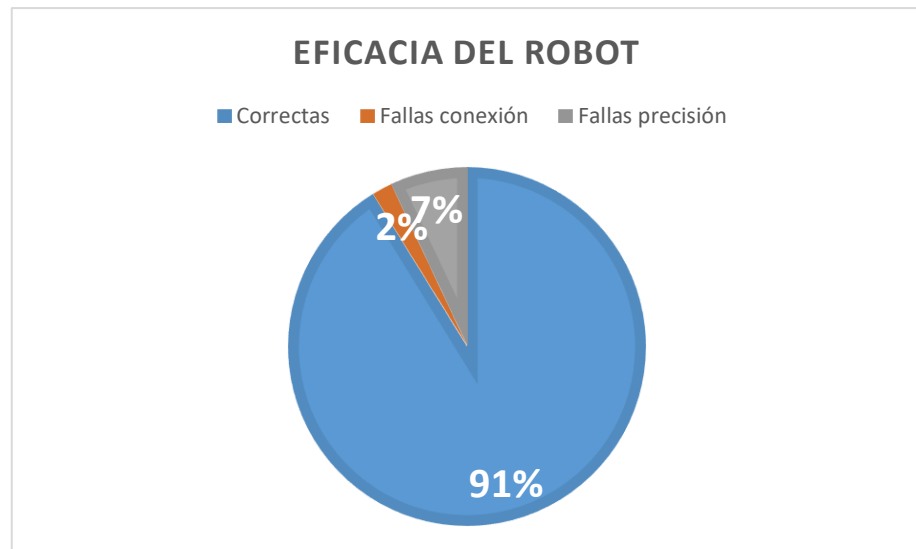
Tabla 5: Velocidades para un correcto funcionamiento

| Variable                      |   | V     |
|-------------------------------|---|-------|
| Velocidad homing<br>(steps/s) | X | <500  |
|                               | Y | <500  |
|                               | Z | <500  |
| Velocidad Máxima<br>(steps/s) | X | <4000 |
|                               | Y | <4000 |
|                               | Z | <800  |
| Velocidad Mínima<br>(steps/s) | X | <700  |
|                               | Y | <700  |
|                               | Z | <700  |
| Aceleración (steps/s)         | X | <500  |
|                               | Y | <500  |
|                               | Z | <500  |
| Funcionamiento                |   | C     |

Fuente: Fuente propia

Bajo estas condiciones y las condiciones que se desarrollan en planteamiento de trayectoria, se establece un trabajo correcto y continuo del robot. Estas velocidades y aceleraciones pueden variar dependiendo del lugar de trabajo, por lo que hace al robot una herramienta muy versátil en el trabajo de diferentes plantas.

De acuerdo con el trabajo del robot durante los 3 meses y el uso de la trayectoria planteada en este proyecto, se determina la eficacia del funcionamiento con los datos obtenidos de 488 ensayos mostrados en el gráfico 3.



*Gráfico 3: Eficacia del funcionamiento del robot*  
*Fuente: Fuente propia*

Para determinar la eficacia del robot, hacemos uso de la ecuación 1:

$$Eficacia \% = \frac{(ensayos\ correcto * 100)}{total\ de\ ensayos} \dots (ec. 1)$$

$$Eficacia \% = \frac{(445 * 100)}{488}$$

$$Eficacia \% = 91.18 \%$$

Este valor se obtuvo luego de configurar todo el sistema del robot y con un planeamiento ordenado propuesto en este trabajo. En las figuras 35 y 36 se muestran el trabajo establecido durante una hora.

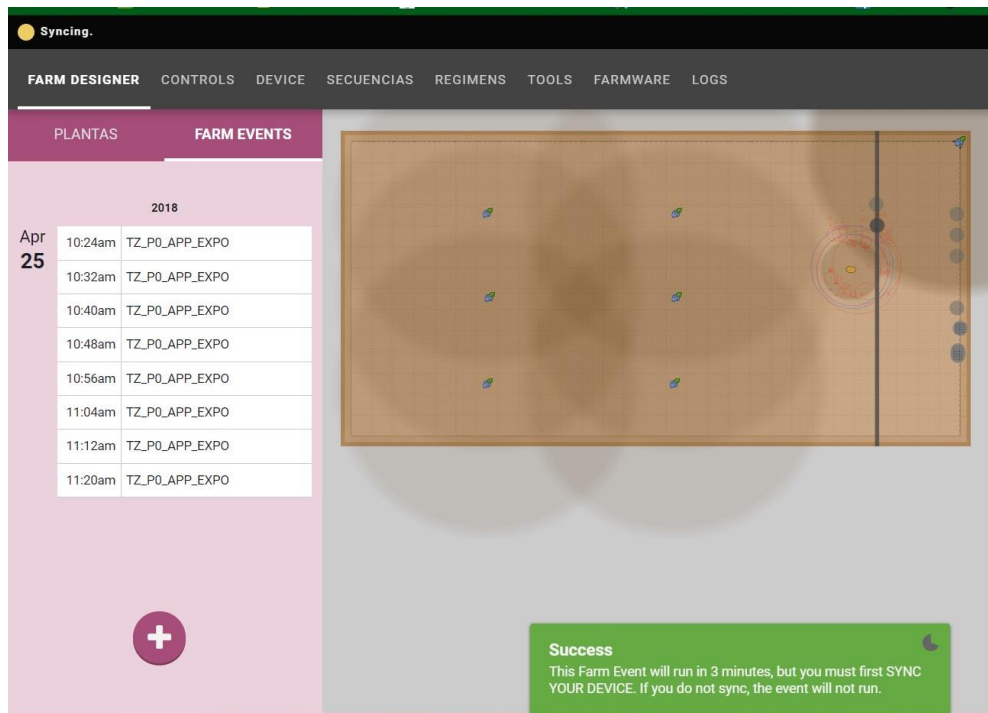


Figura 35. Trabajo realizado durante 1 hora en el día 25-04-2018  
**Fuente:** Fuente propia

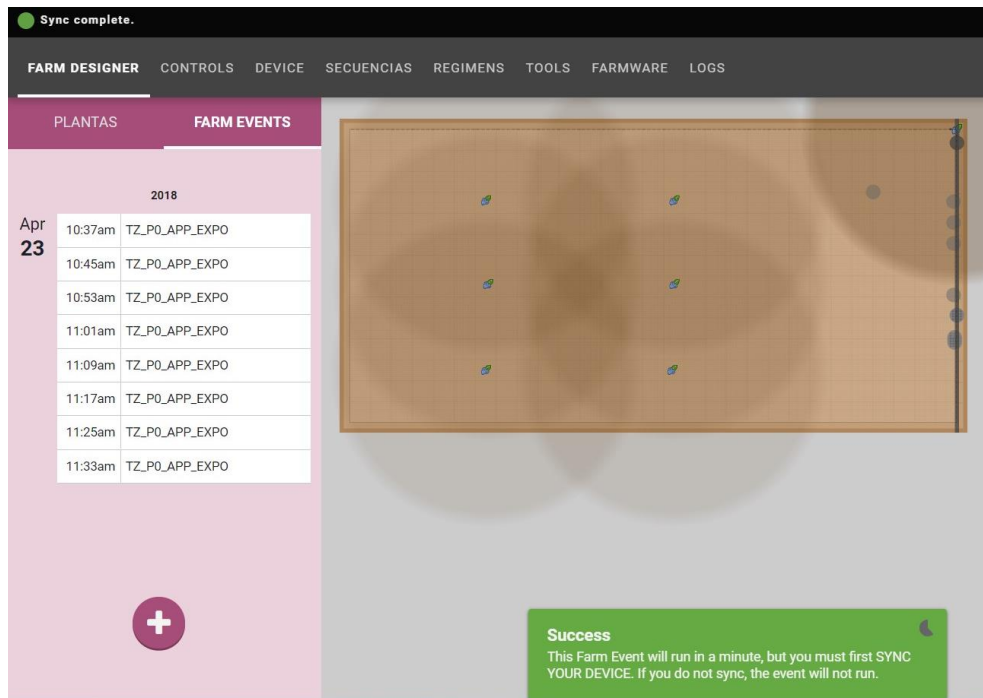


Figura 36. Trabajo realizado durante 1 hora en el día 23-04-2018.  
**Fuente:** Fuente propia.



### 4.3. Planeamiento de trayectoria.

Mediante el desarrollo y ejecución del planeamiento de trayectoria propuesta en este trabajo, se logró una mejora considerable en el correcto funcionamiento del robot, permitiendo tener una eficacia en funcionamiento del 91%, este valor fue obtenido mediante el trabajo durante 3 meses y mediante la configuración del robot bajo las siguientes características propuestas en este trabajo:

- El diagrama de trabajo general permite dividir cualquier trabajo en diferentes procesos (proceso 1, procesos 2... procesos n) que depende de la necesidad de la persona y del entorno de trabajo. Estos procesos son de fácil acceso y configuración mediante el apartado de secuencias que posee la página web.
- La estructura posee procedimientos fijos los cuales están relacionados a la cogida y dejada de herramientas en la bandeja del robot, que poseen una velocidad de 60 % de la velocidad máxima del robot y dos puntos de referencia en el eje Z y X, para evitar colisiones y un correcto acople con el UTM.
- Posee una secuencia o procedimiento de seguridad, el cual está basado en la confirmación de la conexión de la herramienta al UTM, para luego activar la variable de error (relacionada a la altura en el eje Z, pudiéndose cambiar a valores como ubicaciones cartesianas, estado de los pines, entre otras) y de esa manera, terminar o continuar con los siguientes procesos.
- Todo proceso inicia con la verificación de la existencia de una herramienta acoplada al UTM, ya que este puede dañar las plantas o colisionar con la estructura del robot. En caso de que existe acoplada una herramienta al UTM, nos envía un mensaje de alerta y terminar el proceso, caso contrario, continua con el proceso.
- Todo proceso inicia y termina en Home (ubicación cartesiana 0,0,0), para un correcto funcionamiento del sistema.
- Este programa está desarrollado en el entorno de secuencias de la página web, bajo los comandos que este nos brinda, pero pudiéndose replicar en programación Python mediante el desarrollo de firmware.

#### 4.4. Plataforma de desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes.

Se establece los parámetros de configuración y desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes aplicados al control de calidad en plantines de alcachofa, mediante el uso Farmware (detallado en algoritmos de procesamiento de imágenes, página 68), desarrollados sobre la visión artificial del robot. Al ser ésta una plataforma de desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes (figura 37), aplicadas al control de calidad en plantines de alcachofa, permite desarrollar no sólo algoritmos para esta clase de plantines, sino que también pueda desarrollarse algoritmos compatibles con otras especies de plantines que sean de importancia al sector agroindustrial de nuestro país.

También, esta plataforma de desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes nos permite proponer aplicaciones en el control de salud de los plantines, ya que, al poder ajustar los rangos de colores admitidos en la detección de plantas, podemos reconocer aquellos plantines que muestren un color específico en caso de estar bajo alguna plaga y sea indicio de mala salud del plantín.

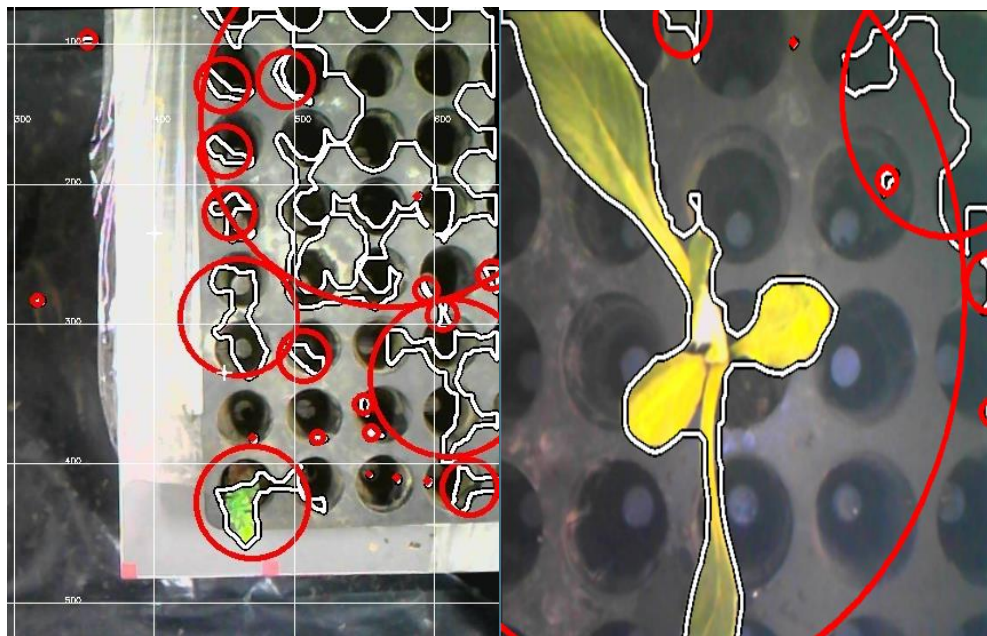


Figura 37. Desarrollo de algoritmos de prueba en procesamiento de imágenes.

Fuente: Fuente propia.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Las características que posee el robot nos brindan una versatilidad en el trabajo del robot, pudiéndolo configurar y calibrar dentro de diferentes entornos de trabajo, pero dependiendo su funcionamiento de una correcta conexión a internet y a las actualizaciones que disponga el servidor de la empresa.
- Todos los valores medidos en la calibración y configuración son en base a nuestro entorno de trabajo, por lo que estos valores pueden cambiar en otros entornos de trabajo
- El planeamiento de trayectoria del robot puede adaptarse a cualquier trabajo y muestra un trabajo correcto a lo largo de todos estos meses.
- El desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes es una gran herramienta para nuevos trabajos realizados sobre plantines dentro de viveros industriales.

## VI. CONCLUSIONES

- Mediante la investigación del funcionamiento del robot, se estableció que posee una estructura completa y versátil para el desarrollo de algoritmos en procesamiento de imagen, aplicado al control de calidad en plantines.
- Se logró satisfactoriamente la implementación de la estructura metálica y del sistema electrónico del robot, partiendo desde la investigación de la función desempeñada de cada elemento del robot para así lograr el funcionamiento en nuestro entorno de trabajo y bajo nuestras condiciones establecidas en el presente trabajo. También se logró identificar errores recurrentes en la en el funcionamiento del robot durante todo el tiempo en que viene desarrollando el proyecto.
- Se estableció un planeamiento de trayectoria general y específica para el correcto funcionamiento del robot en trabajos que replican procesos de un vivero industrial, logrando una eficacia del 91% en el correcto funcionamiento del robot. Dentro de esta estructura de funcionamiento se contemplan pasos de seguridad para evitar colisiones del eje Z con plantas o con la misma estructura de metal del robot.
- Se estableció una metodología para el desarrollo de algoritmos en procesamiento de imágenes para el control de calidad en plantines de alcachofa, partiendo desde la investigación del flujo de información en el que este proceso adquiere la imagen, la procesa en un servidor web mediante Internet y la devuelve a nuestra aplicación web.

## VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para trabajos futuros, implementar un servidor propio para tener un control completo sobre el funcionamiento del robot, así como también el diseño del sistema operativo basado en la misma tecnología, para poder realizar configuraciones y adaptar el funcionamiento de éste, a entornos amplios de viveros industriales.
- Para trabajos futuros, se recomienda agregar un espacio separado para la toma de imágenes, el cual nos permita desarrollar métodos de procesamiento de imágenes como: 2D mediante el uso de cámaras para determinar patrones morfológicos de las plantas; análisis de imágenes de fluorescencia utilizadas principalmente para la detección de enfermedades foliares y las imágenes térmicas para el estado hídrico de la planta; reconstrucción 3D para la estimación de la biomasa y para un análisis completo de los patrones morfológicos (dimensiones de las hojas, grosor de tallo, número de hojas, altura, colores) de las plantas; y procesamiento de imágenes hiperespectrales (espectroscopia de imágenes) utilizado en el fenotipado de plantas, lo que nos brinda una gran cantidad de información de los plantines.
- Para manipulación de plantines, se recomienda desarrollar nuevas herramientas que permitan al robot, trasladar plantines, semillas y/o diferentes objetos para el continuo control de crecimiento como de calidad de los plantines. Cabe destacar que durante este trabajo se desarrolló un prototipo de garra para manipulación de plantines que se encuentra desarrollado en el Anexo 03.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEX. (Diciembre de 2017). *ADEX Asociación de exportadores*. Obtenido de <http://www.adexperu.org.pe/lista-boletines/>
- Agronegocios Génesis . (Noviembre de 2017). *Agronegocios Génesis* . Obtenido de <http://www.agrogenesis.com/division-viveros>
- Buemi, F., Massa, M., & Sandini, G. a. (1996). The agrobot project. *Advances in Space Research*, 18(1-2):185-9.
- Cabrera Aguayo, F., & Barcia Macias, R. (2018). ESTADO DEL ARTE DE ROBOTICA EN LA AGRICULTURA. *Eumednet*, <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/05/robotica-agricultura.html>.
- Caceres, J. M. (2001). *Arboles ornamentales*. España: Mundi-Prensa.
- Choque Moscoso, C. J., Fiestas Sorogastúa, E. M., & Prado Gardini, R. S. (2018). Efficient implementation of a Cartesian Farmbot robot for agricultural applications in the region La Libertad-Peru. *Memorias del Congreso Internacional IEEE Colombia ANDESCON*.
- del Carmen Villarreal, J., Luisa Medina, A., Andara, Y., Carrizo, M., Vielma, J., & Cabrera, H. (2015). Manual Básico: Generalidades de un vivero. Cuaderno número 5. *Manual Básico: Generalidades de un vivero*, 10-12.
- Farmbot Inc. (07 de Setiembre de 2018). Obtenido de Farmbot Inc. Coporation web site: <https://farm.bot/>
- Farmbot Inc. (2018). *Github*. Obtenido de farmbot - arduino - firmware: <https://github.com/FarmBot/farmbot-arduino-firmware>
- Fiestas Sorogastúa, E. M. (2017). *Control de los movimientos de un robot industrial utilizando un módulo FPGA DE0\_NANO\_SOC de Altera, una PC y una maquina CNC de bajo coste (Tesis de Pregrado)*. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo.
- Foncodes. (2014). Biohuertos familiares para la produccion de hortalizas. *Manual técnico*, 21-33.
- Fumiki Hosoi, K. N. (2011). 3-D Modeling of Tomato Canopies Using a High-Resolution Portable Scanning Lidar for Extracting Structural Information. *Sensors*, 2166-2174.
- Gabriela Buamscha, M., Contardi, L., Dumroese, R., Enricci, J., R., E., Gonda, E., . . . Wilkinson, K. (2012). *Producción de plantas*. Buenos Aires: CFI, CIEFAP y Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- GUTIERREZ, A. J. (2018). Análisis de los resultados obtenidos, sobre el uso de ácido giberélico en el cultivo de la “alcachofa” *Cynara scolymus* L. (Asteraceae) en diferentes zonas geográficas, entre los años 2001-2007. Trujillo, Trujillo.

- Industrial center. (2009). *Computer Numerical Control (CNC)*. Hong Kong: Innova Creative.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (Julio de 2017). *Instituto Nacional de Defensa Civil*. Obtenido de <https://www.indeci.gob.pe/objetos/secciones/MTc=/Mji0/lista/OTk0/201708091706381.pdf>
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática. (2012). *Resultados definitivos IV Censo nacional agropecuario*. Lima: INEI.
- Instituto Nacional Tecnológico. (2016). Manual del Protagonista Viveros y Semilleros. *Dirección General de formación profesional de Nicaragua*, 33 - 35.
- ISO, I. O. (2012). ISO 8373:2012. *ISO International Organization for Standardization*, 16.
- MINAGRI. (Enero de 2017). *Ministerio de Agricultura y Riego*. Obtenido de <http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/difusion/2017/mapa-interactivo-minagri-enero2017.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *vivero forestal para producción de plántones*. Amazonas, Perú.
- Ollero Baturame, A. (2001). *Robótica Manipuladores y robots móviles*. Barcelona - España: Marcombo.
- Proyecto CHAVIMOCHIC. (Enero de 2017). *proyecto CHAVIMOCHIC*. Obtenido de <http://www.chavimochic.gob.pe/noticia.php?id=chavimochic-brinda-apoyo-al-desarrollo-agricola>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2016). *Estado situacional de los viveros forestales en los departamentos de Ancash, Junín, Pasco, Huánuco y Ucayali*. Lima: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestres.
- Smid, P. (2003). *CNC Programming Handbook*. Estados Unidos: Industrial Press, Inc.
- Viveros Génesis. (2017). Plantines. *Viveros Génesis*, 1-2.
- Wakeley, P. C. (1954). *Planting the southern pines*. Carolina del Norte: Forest Service, U.S. Department of agriculture.
- Zhuohua Jiang, Y. H. (2017). Design and force analysis of end-effector. *PLOS ONE*.

# IX. ANEXOS

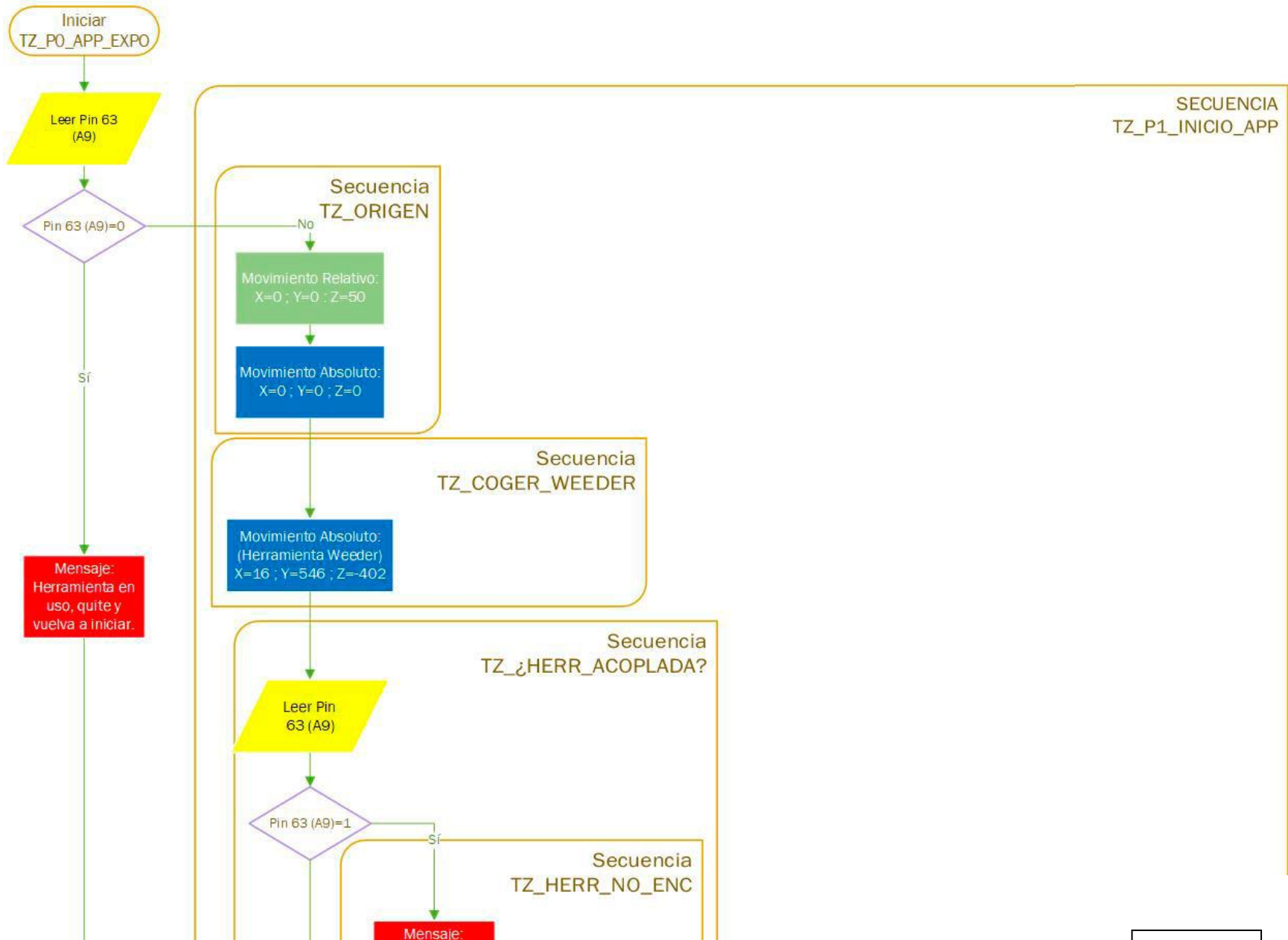


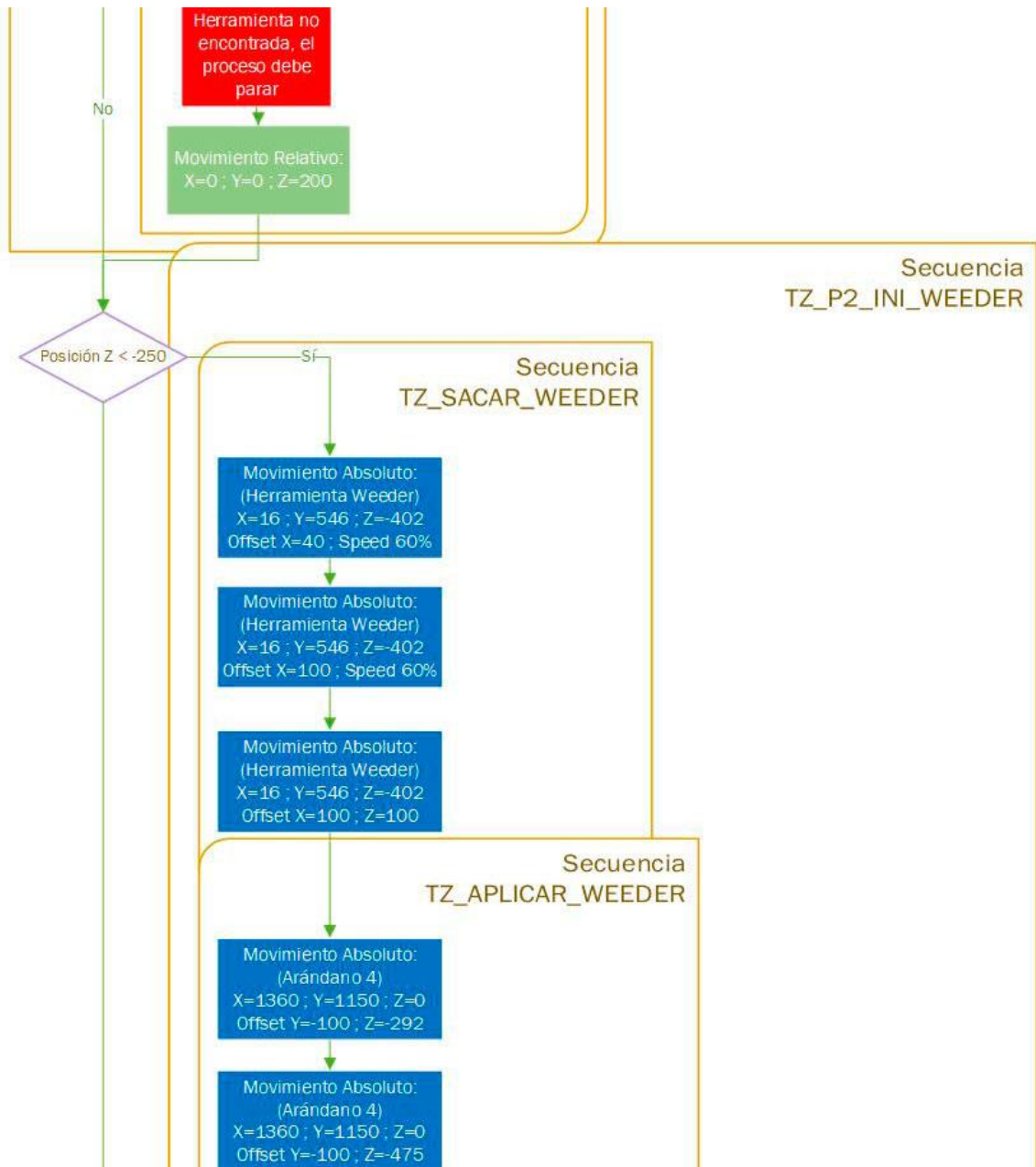
## ANEXO 01

### Diagrama de flujo de la secuencia desarrollada durante 3 meses – vista general

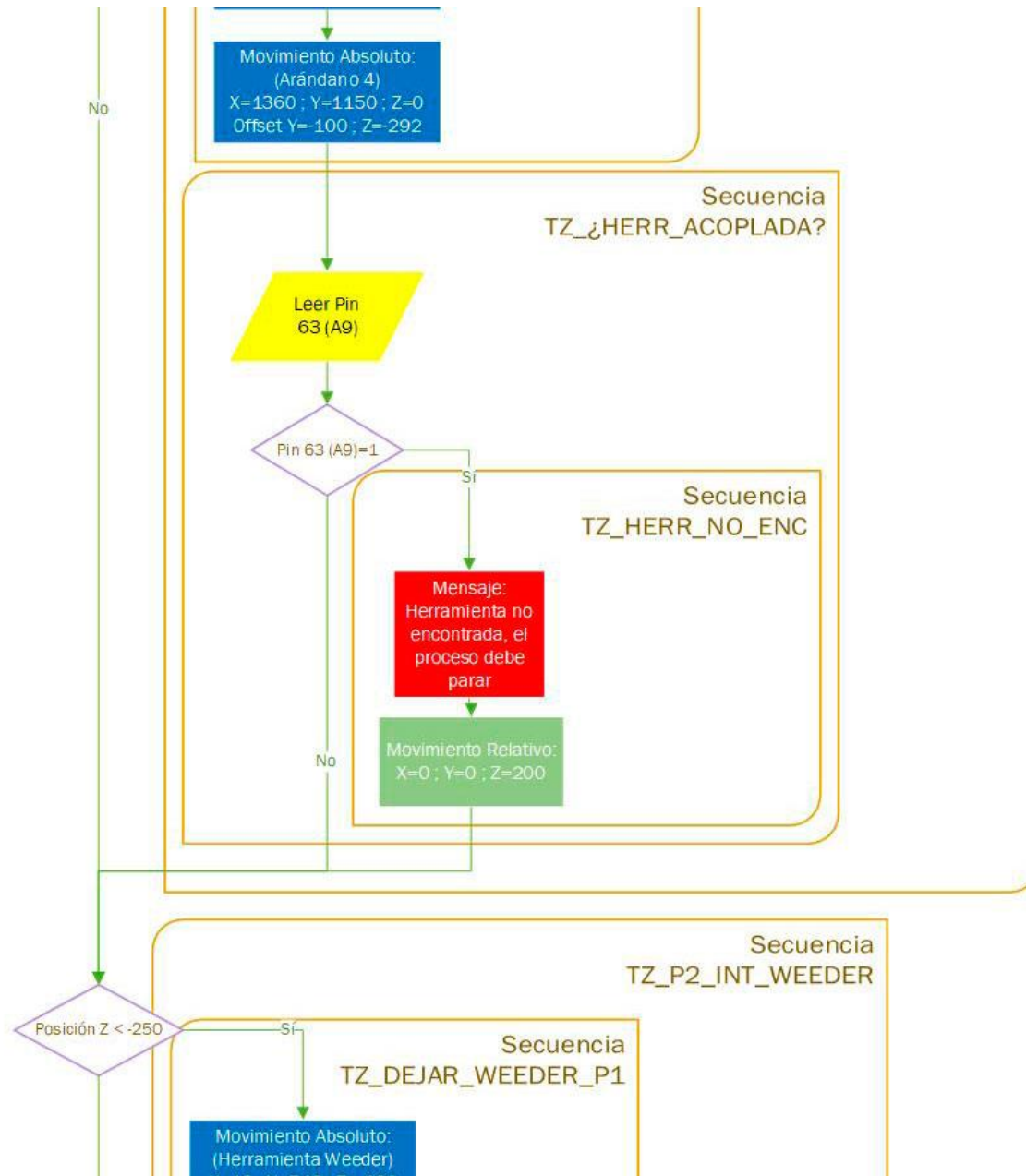


Diagrama de flujo de la secuencia usada para la generación de trayectoria – vista detallada

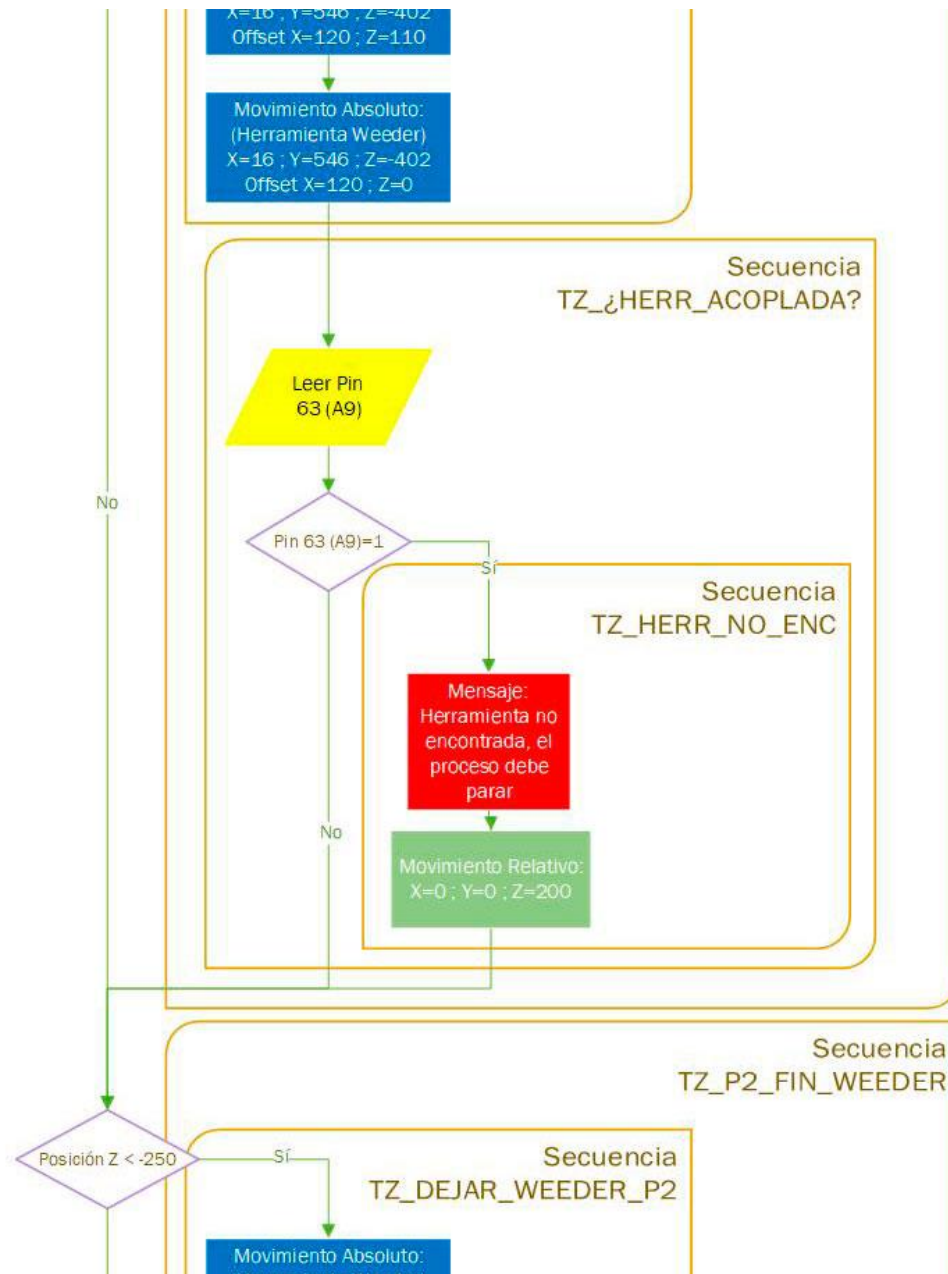




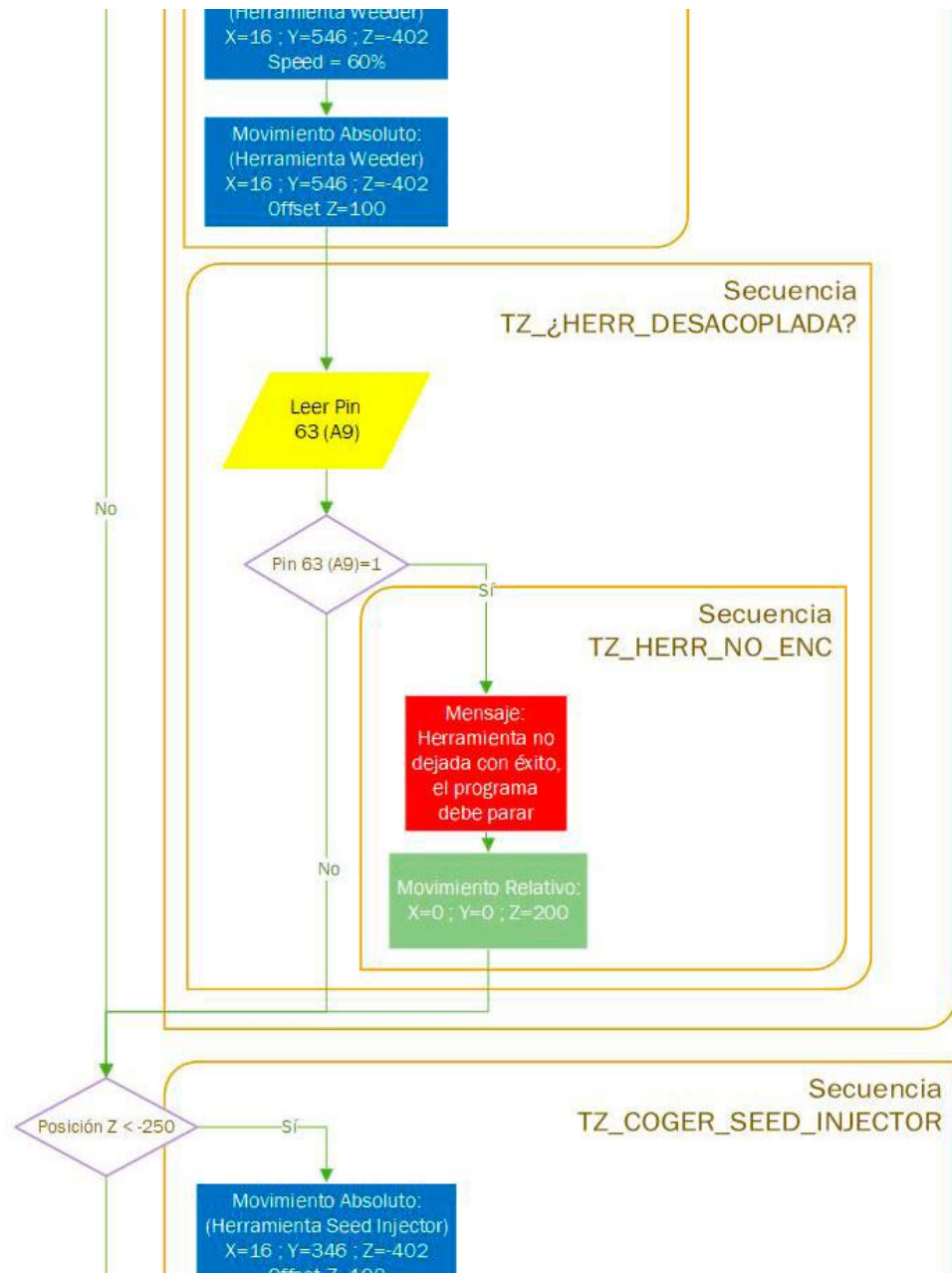
Línea 2



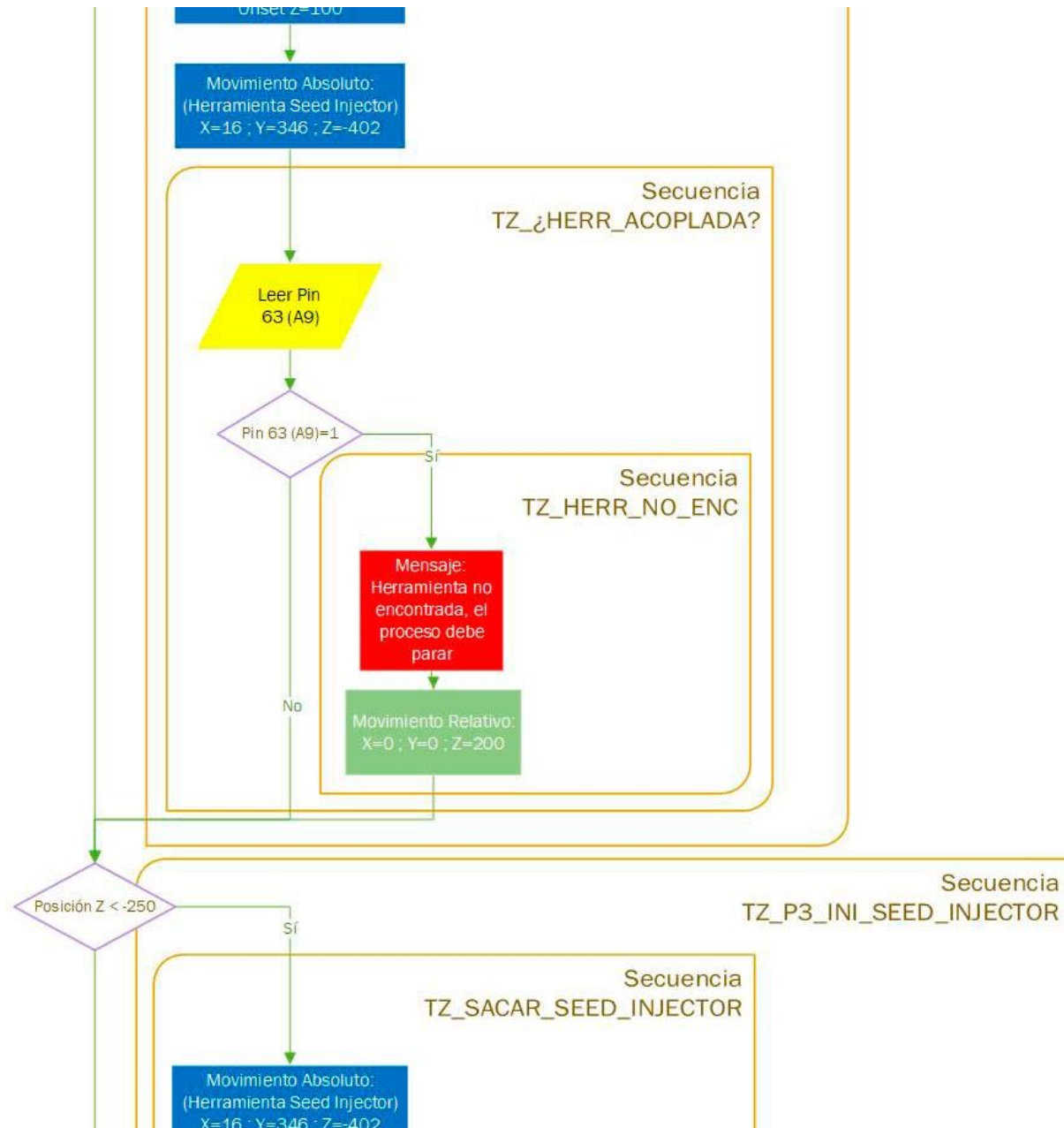
Línea 3



Línea 4



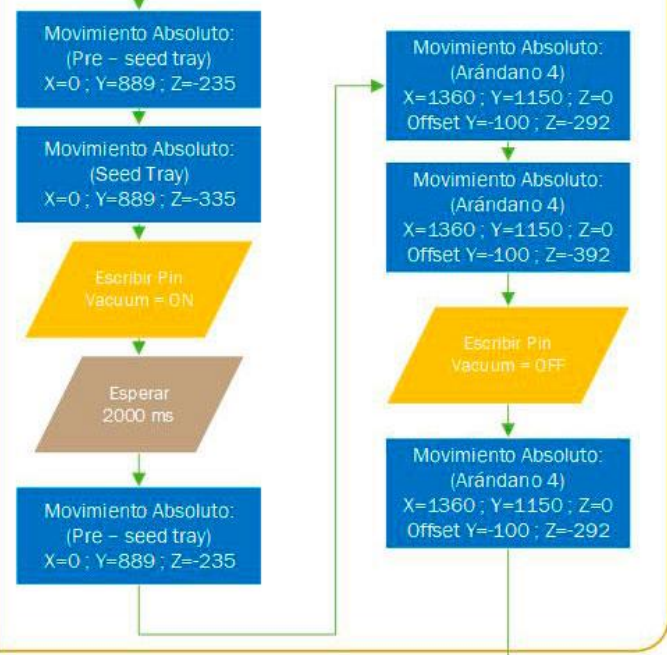
Línea 5



Línea 6



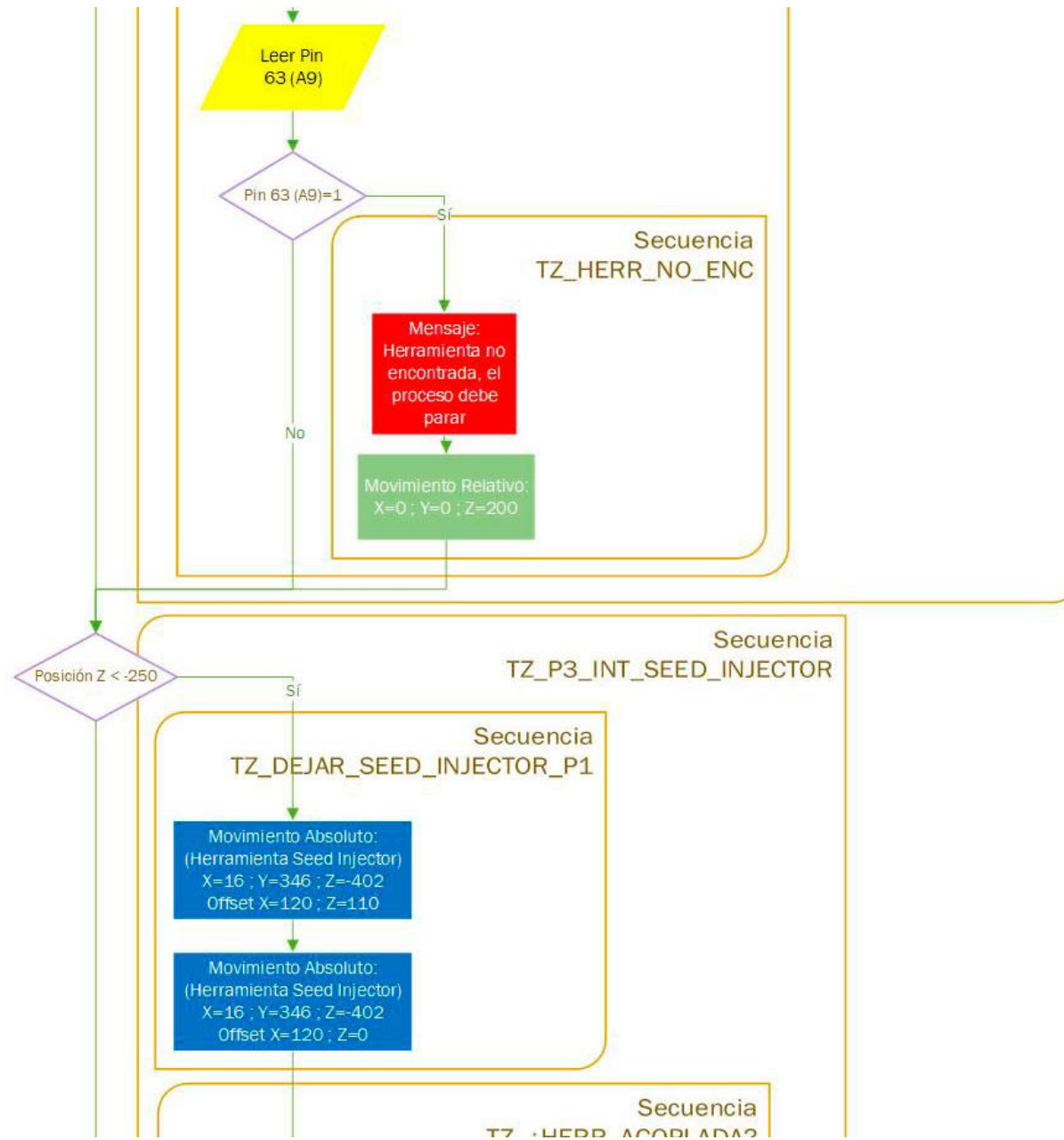
Secuencia  
TZ\_APLICAR\_SEED\_INJECTOR



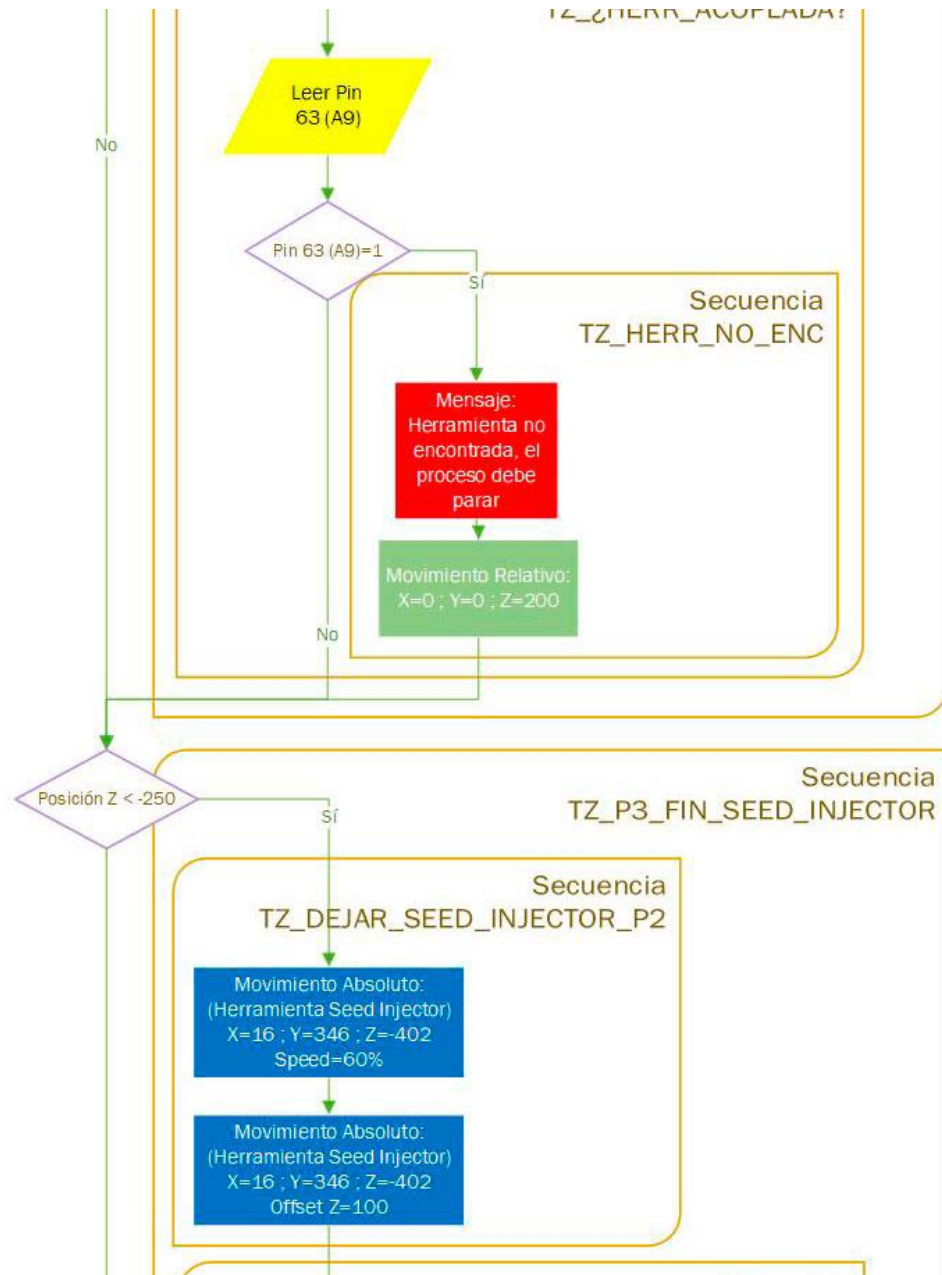
No

Secuencia  
TZ\_¿HERR\_ACOPLADA?

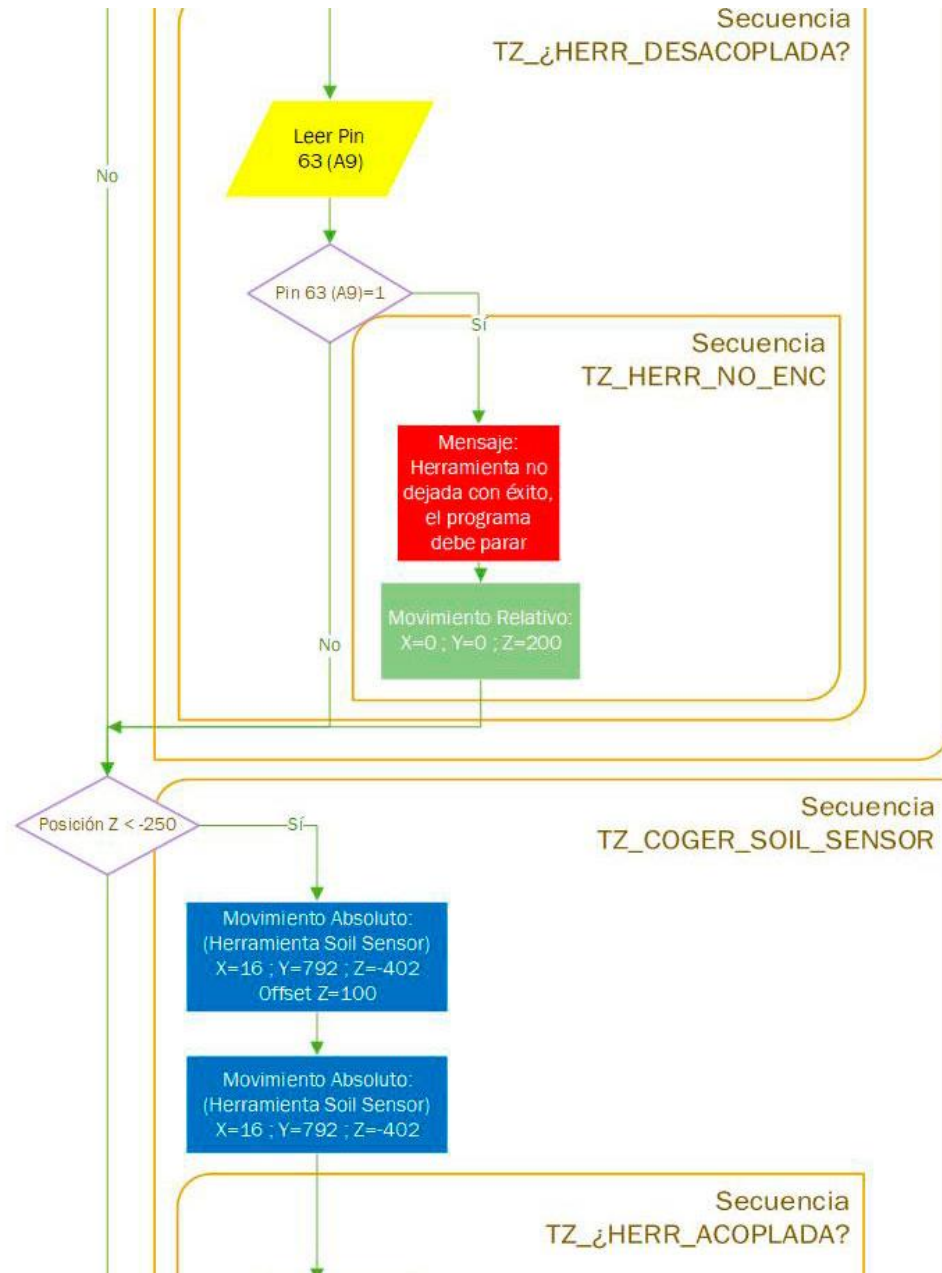




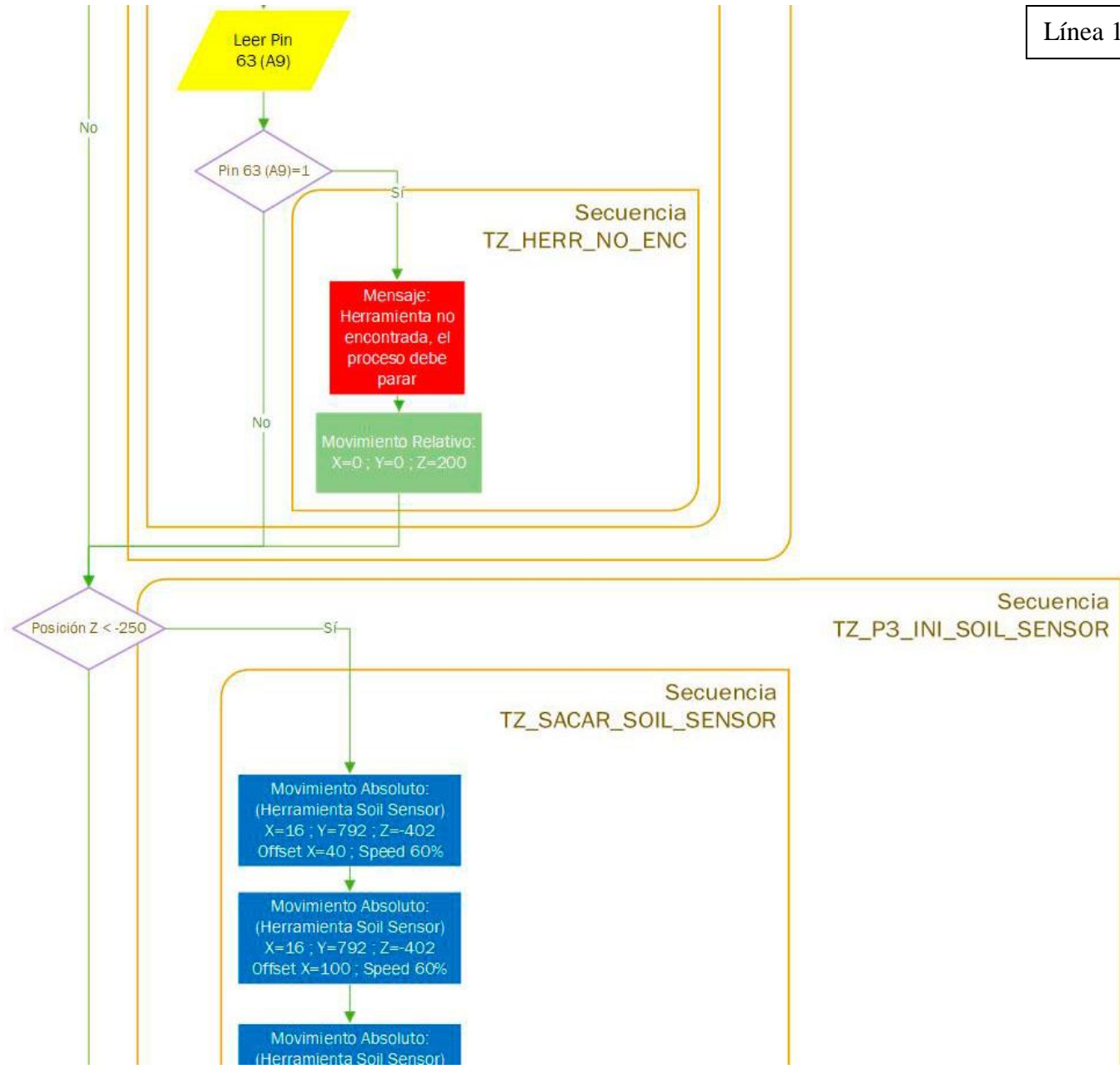
Línea 8



Línea 9



Línea 10



X=16 ; Y=792 ; Z=-402  
Offset X=100 ; Z=100

Movimiento Absoluto:  
(Arandano 6)  
X=1350 ; Y=340 ; Z=0  
Offset: Z=-292

Movimiento Absoluto:  
(Arandano 6)  
X=1350 ; Y=340 ; Z=0  
Offset Z=-484

Leer Pin59  
(A5) Analógico

Pin 59 < 250

Sí

SECUENCIA  
TZ\_P4\_PROC\_DEJSOIL\_SENSOR

No

Movimiento Relativo:  
X=0 ; Y=0 ; Z=100

Secuencia  
TZ\_¿HERR\_DESACOPLADA?

Leer Pin  
63 (A9)

Secuencia  
TZ\_APLICAR\_SEED\_INJECTOR

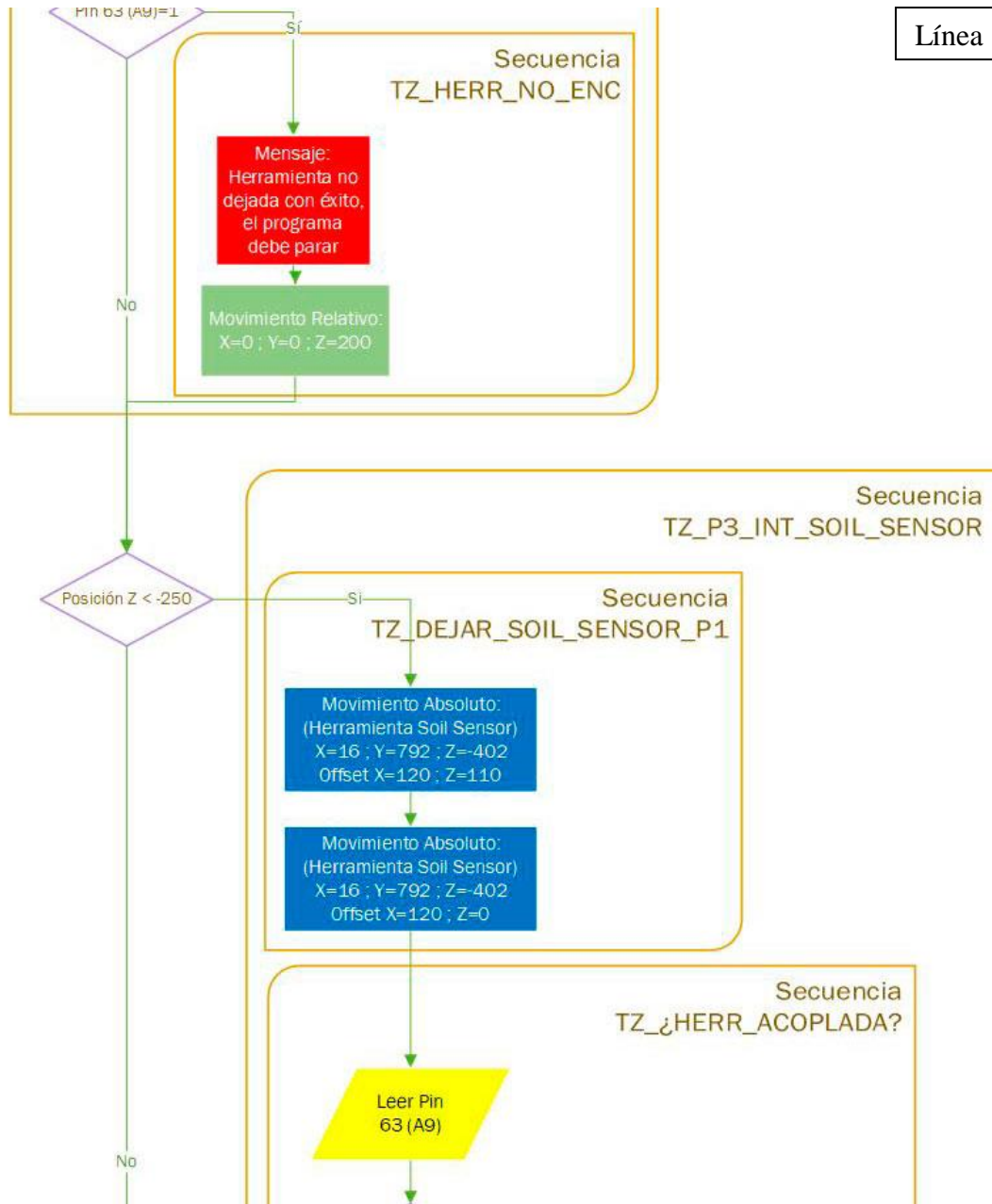
SECUENCIA  
TZ\_SECUENCIA\_RIEGO

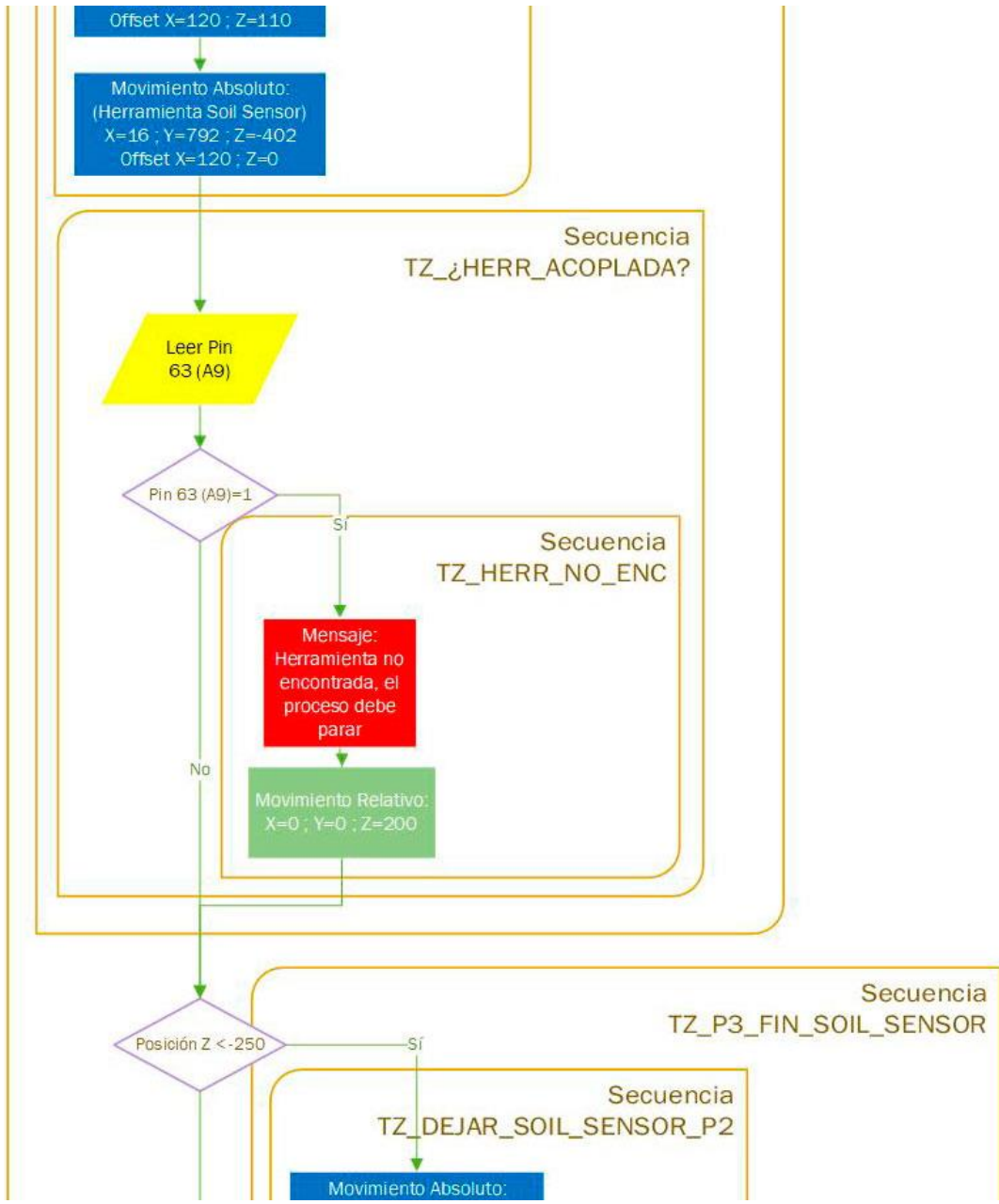
Movimiento Relativo:  
X=0 ; Y=0 ; Z=100

Secuencia  
TZ\_P3\_INT\_SOIL\_SENSOR

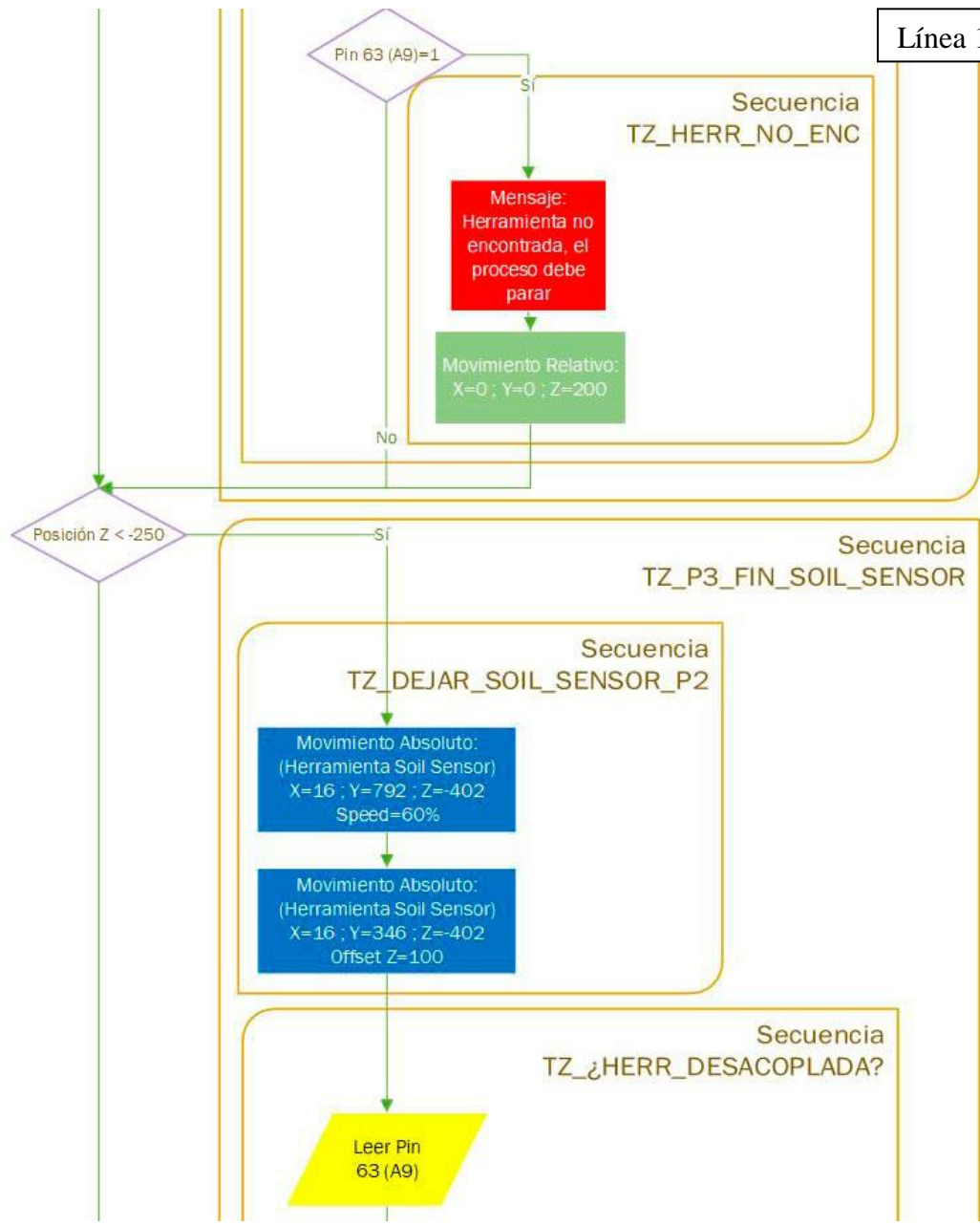
Secuencia  
TZ\_DEJAR\_SOIL\_SENSOR\_P1

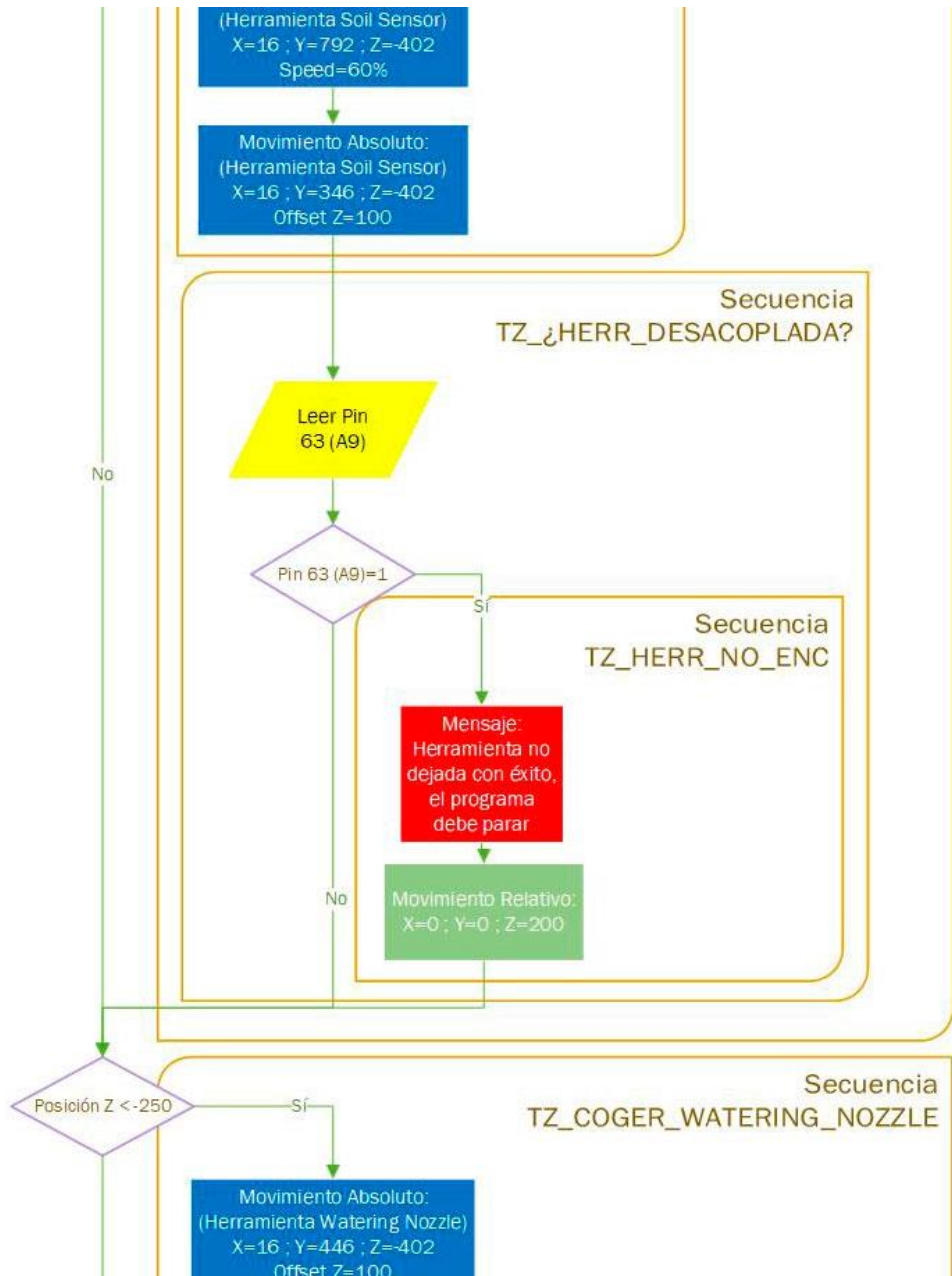
Movimiento Absoluto:  
(Herramienta Soil Sensor)  
X=16 ; Y=792 ; Z=-402

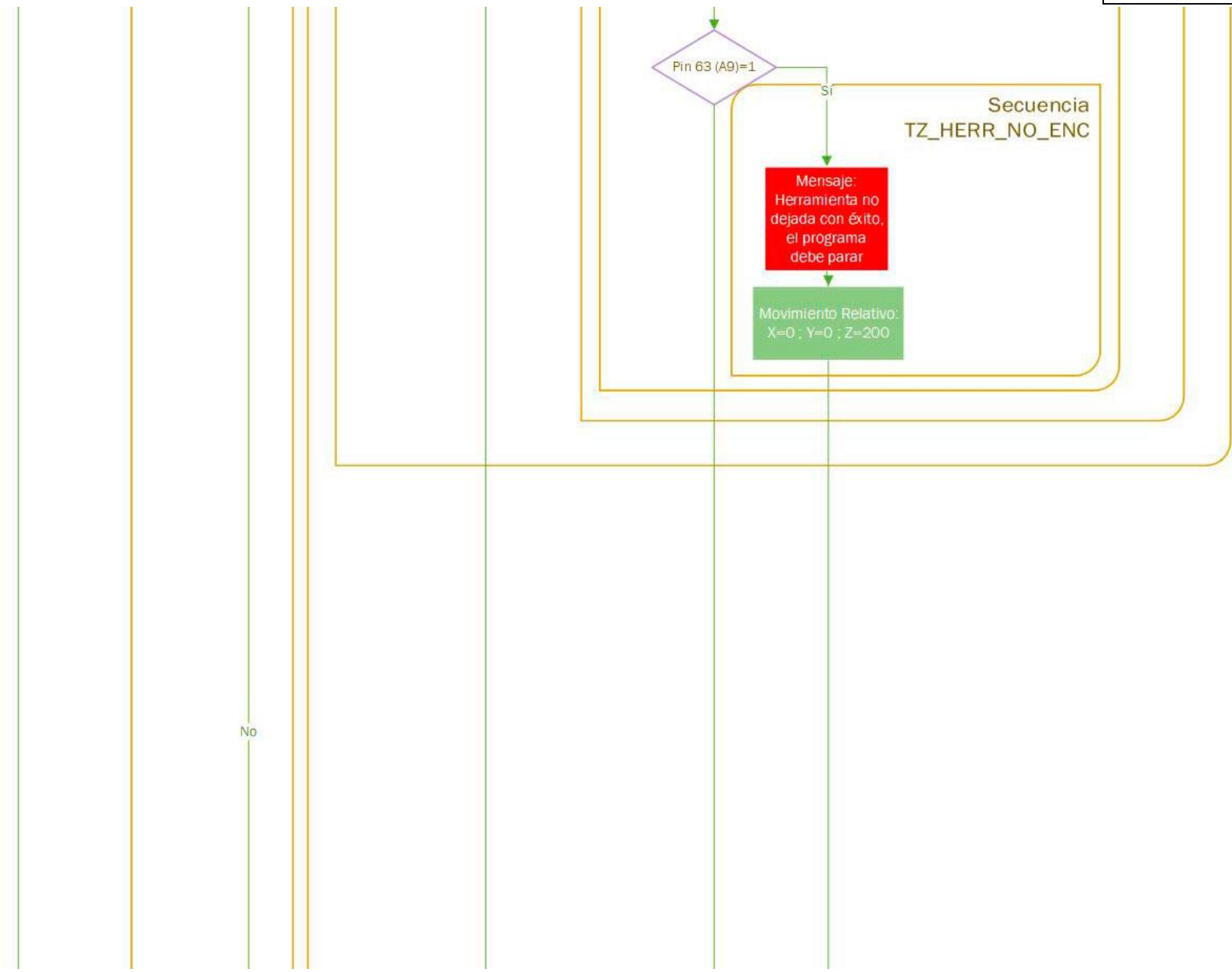


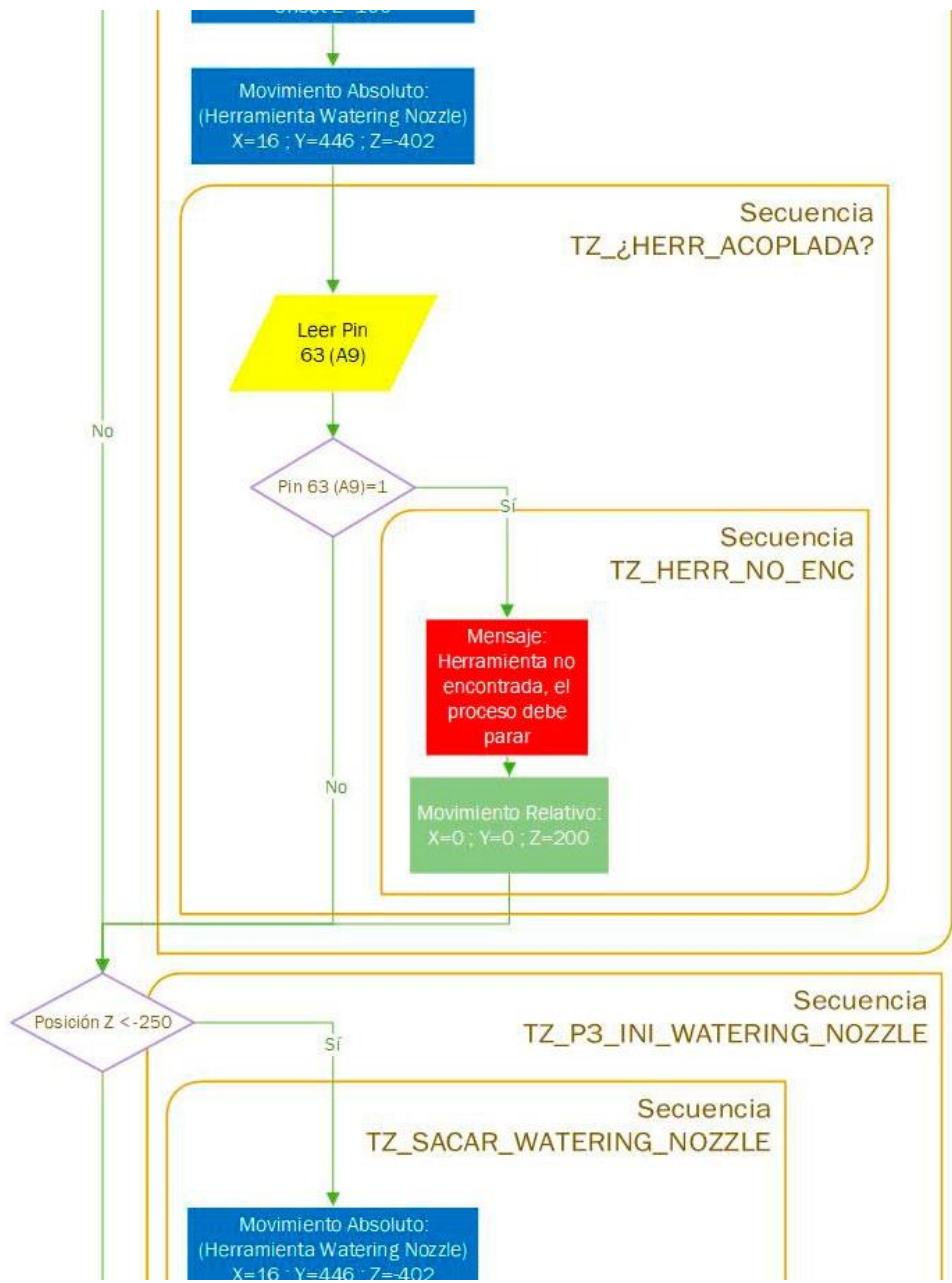


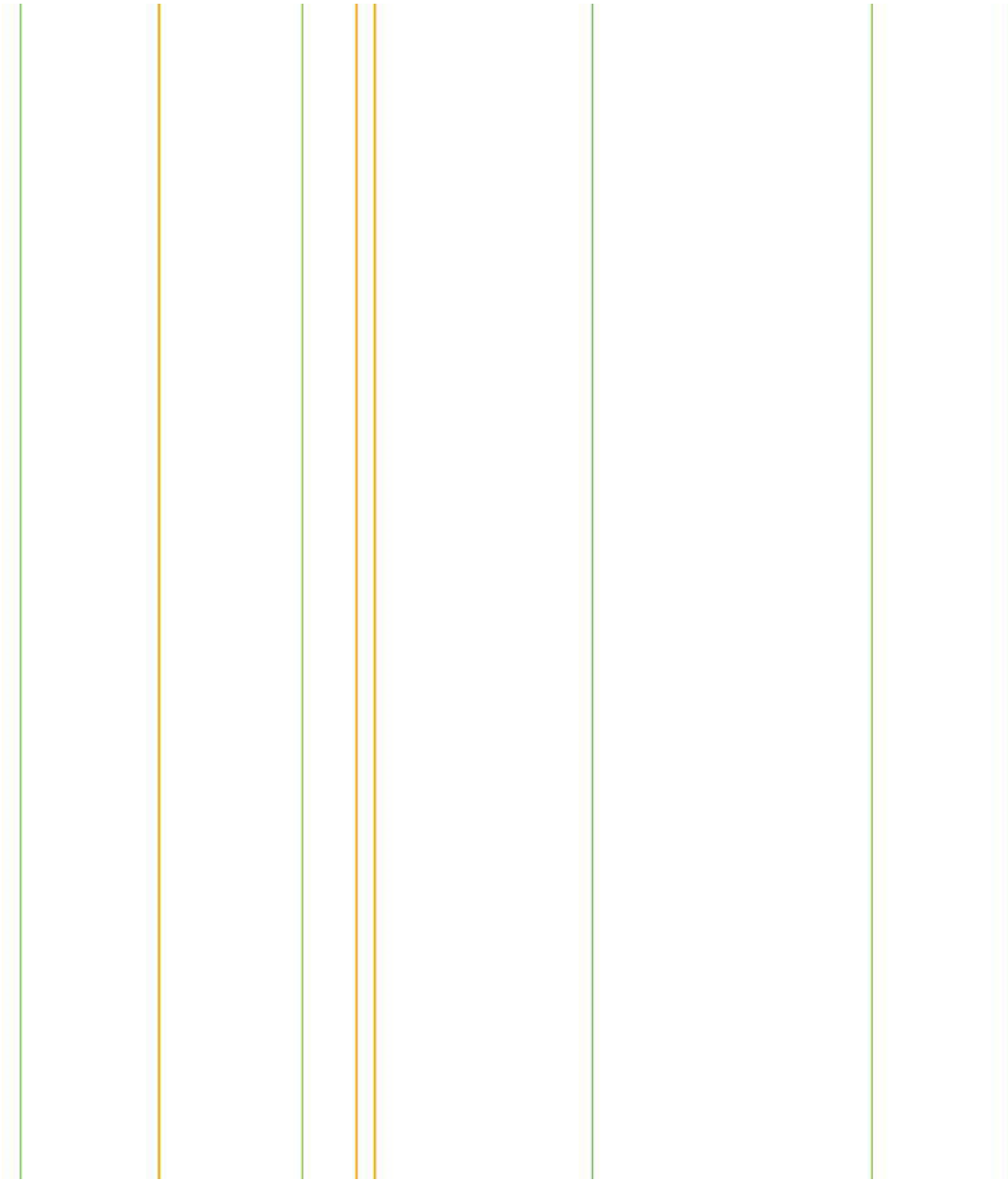


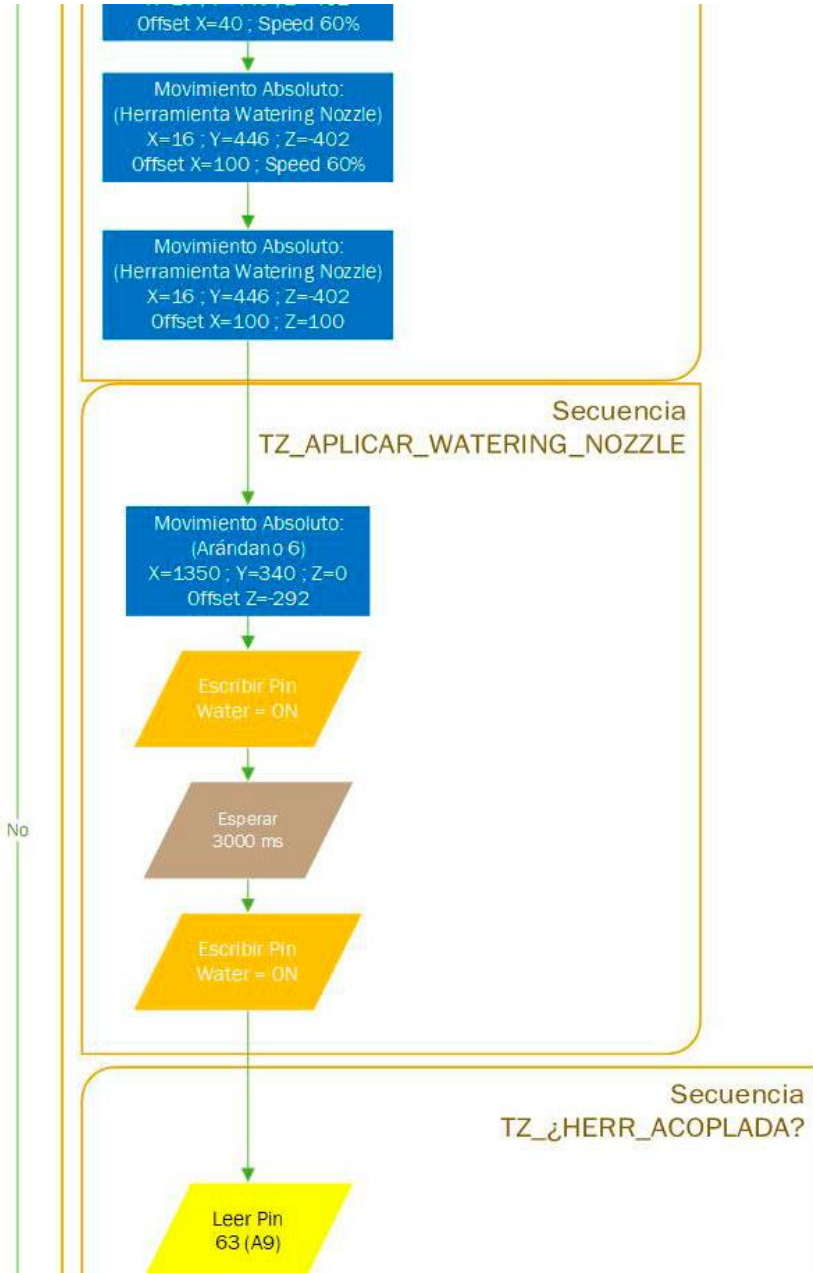




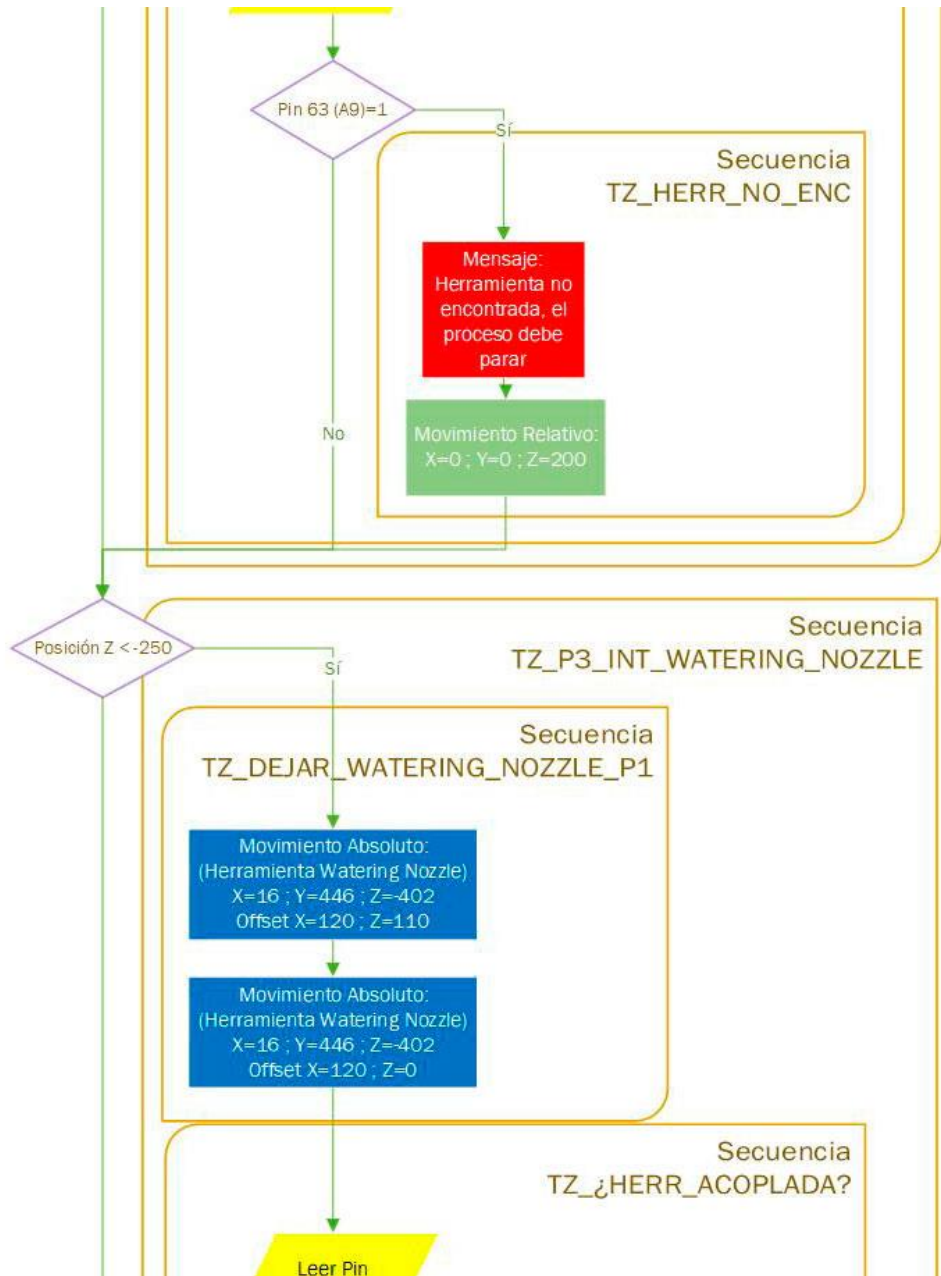






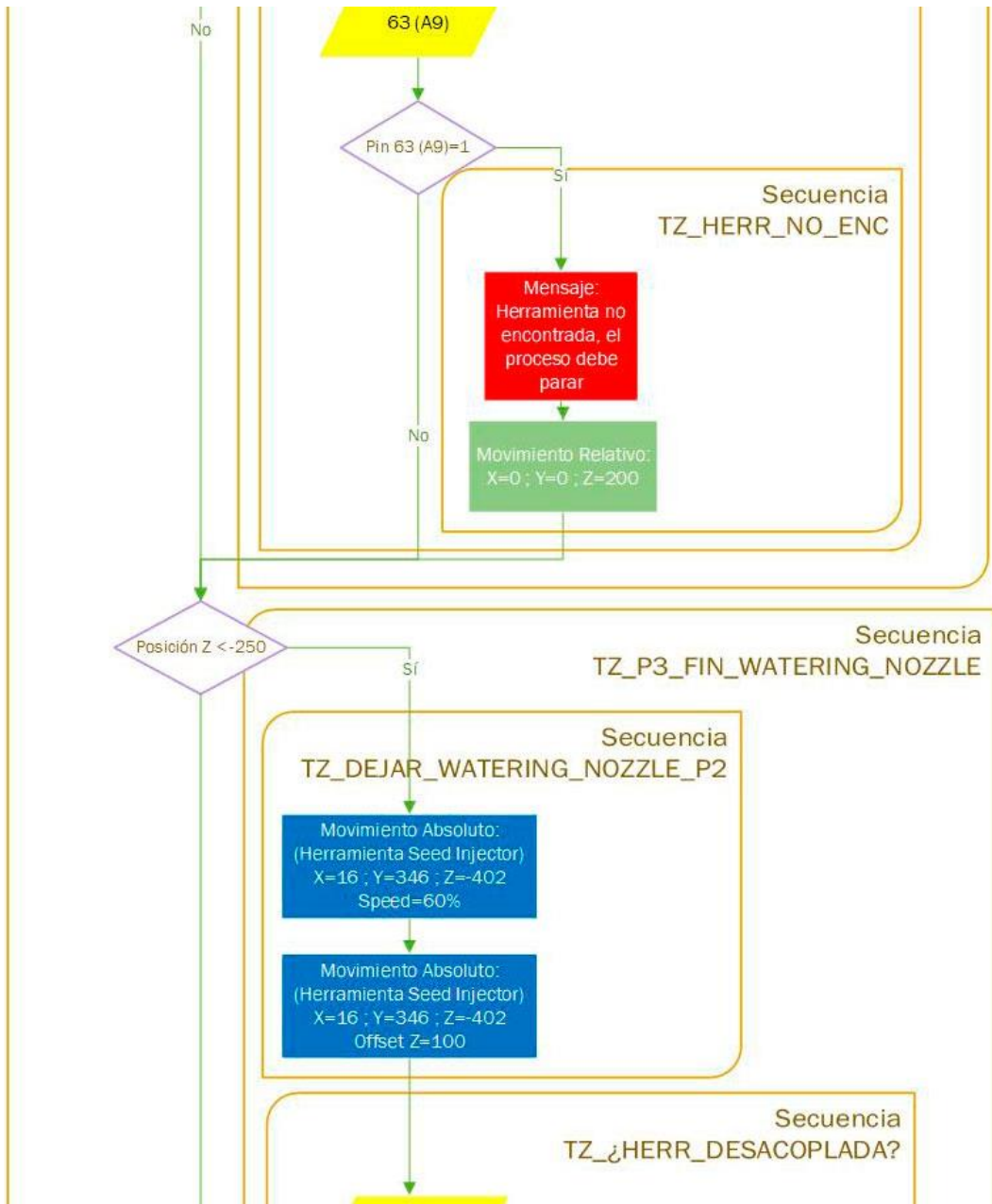


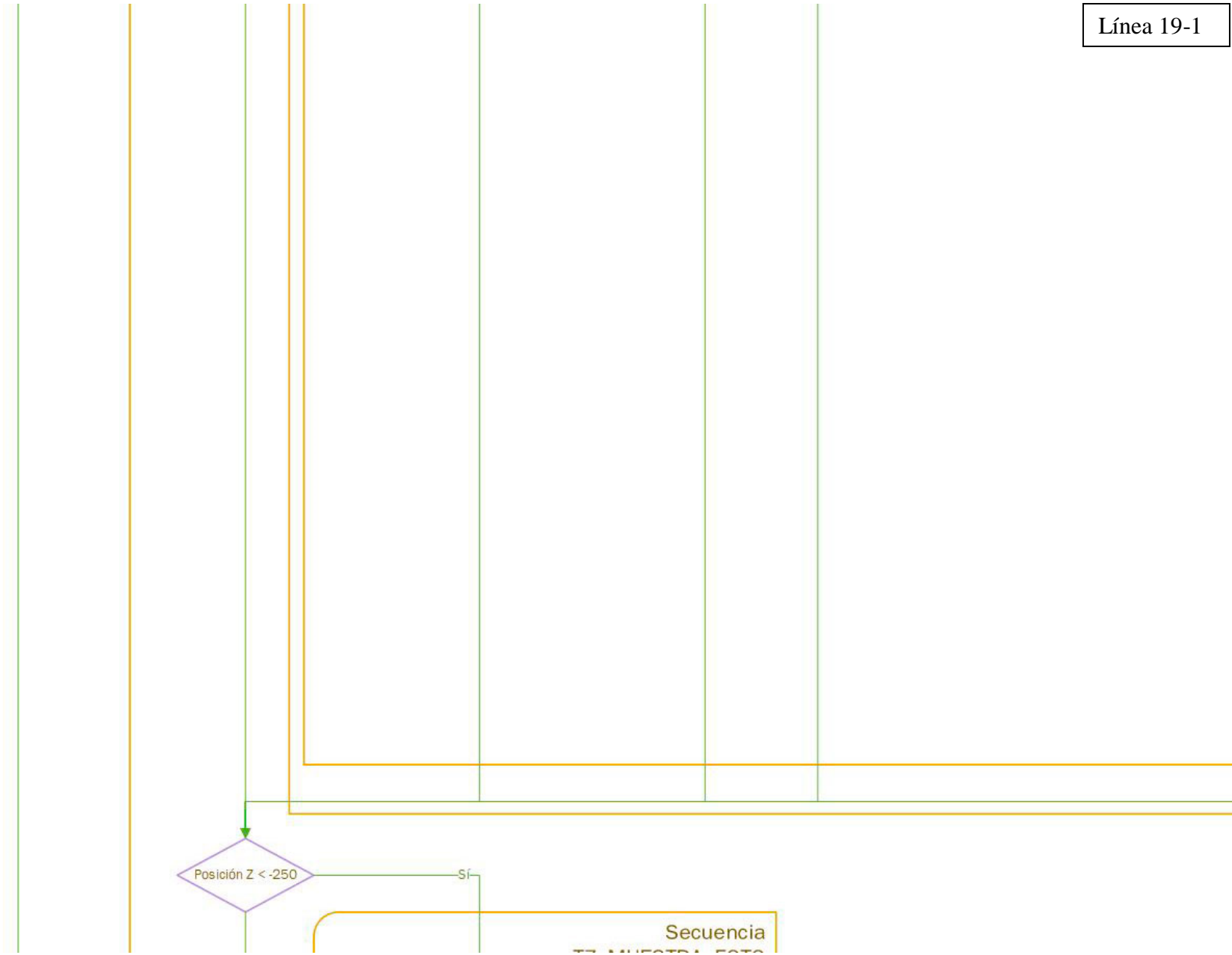


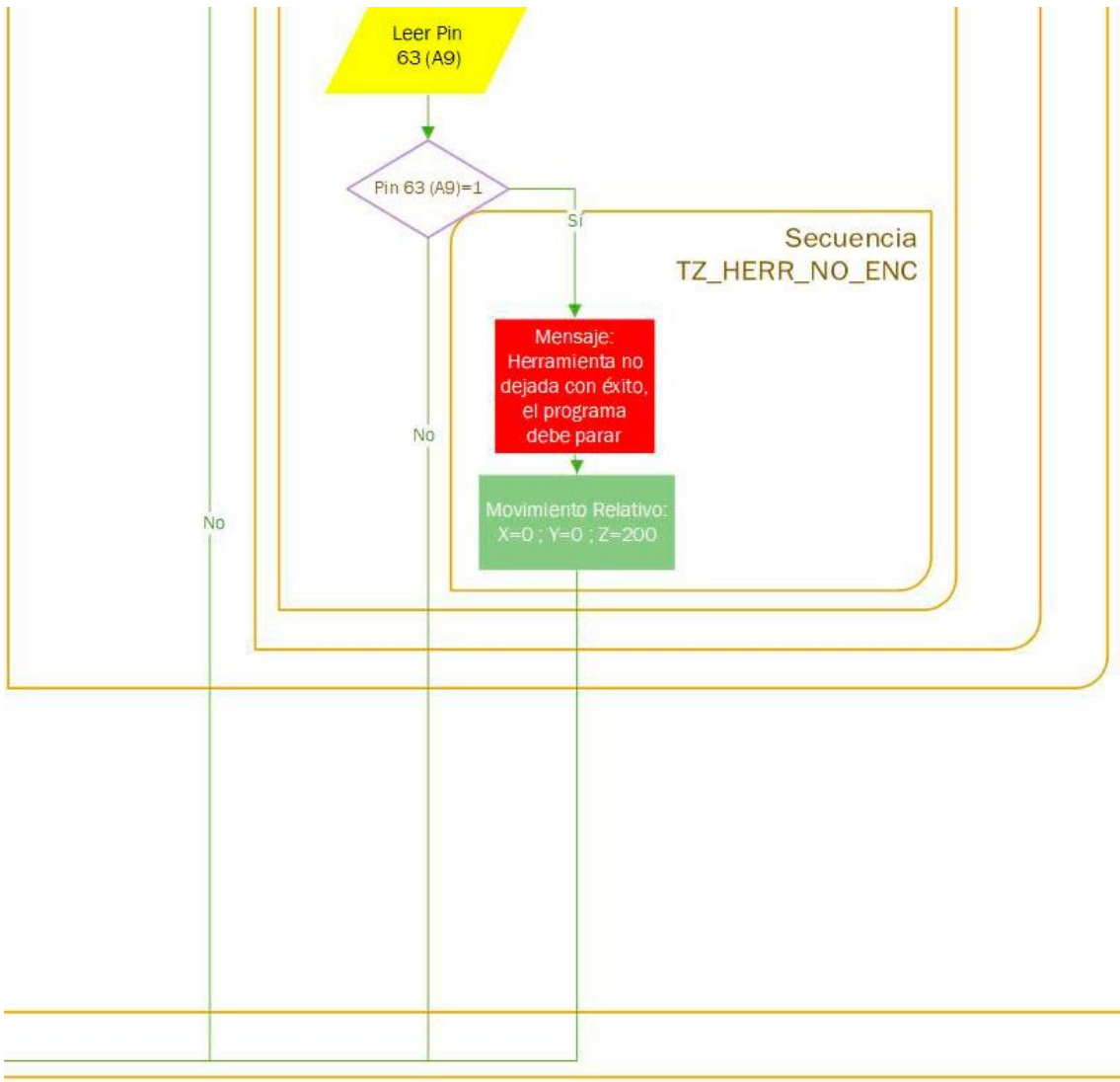


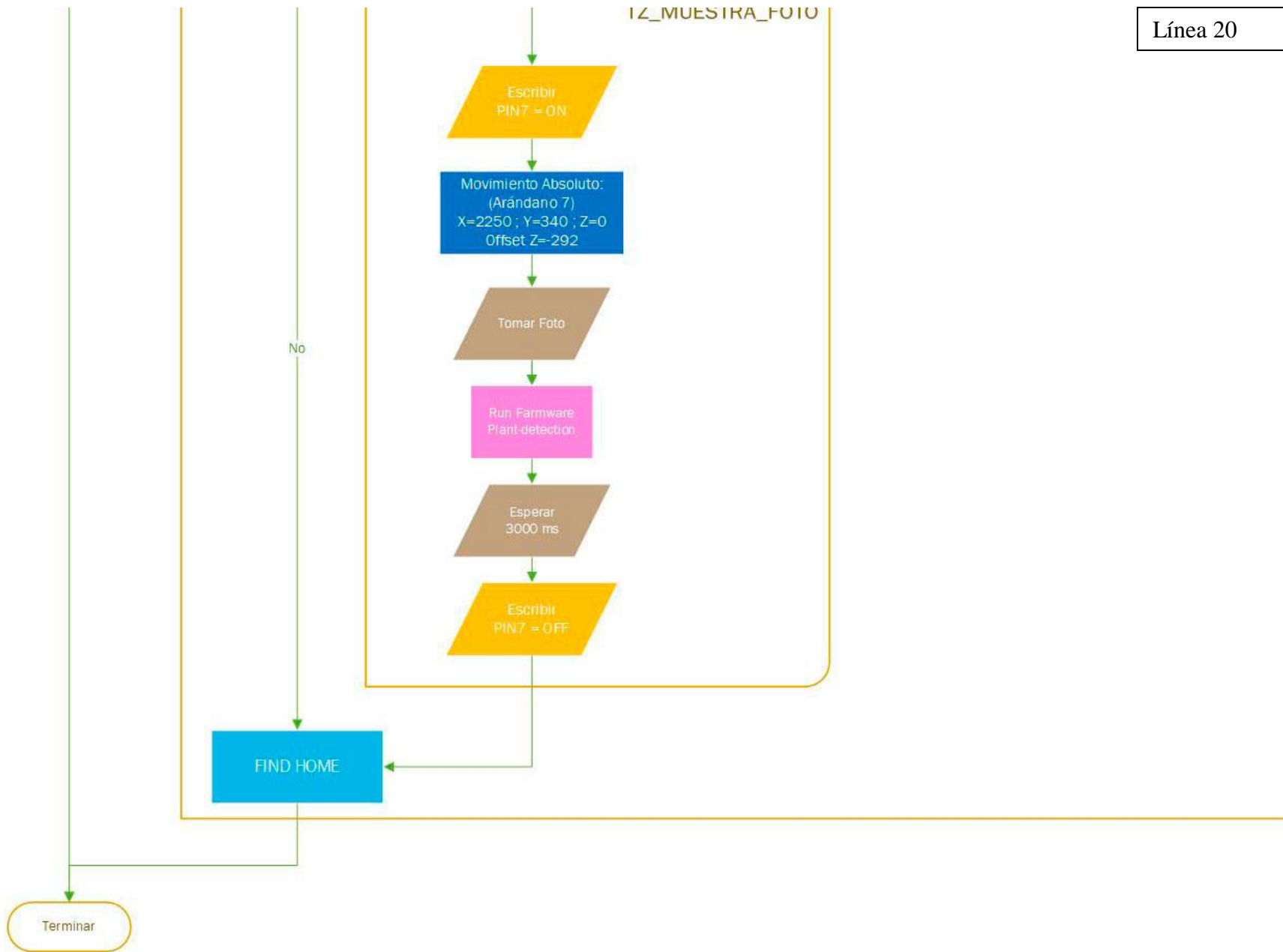


|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|









## Anexo 02

### Resultados obtenidos durante 3 meses de trabajo

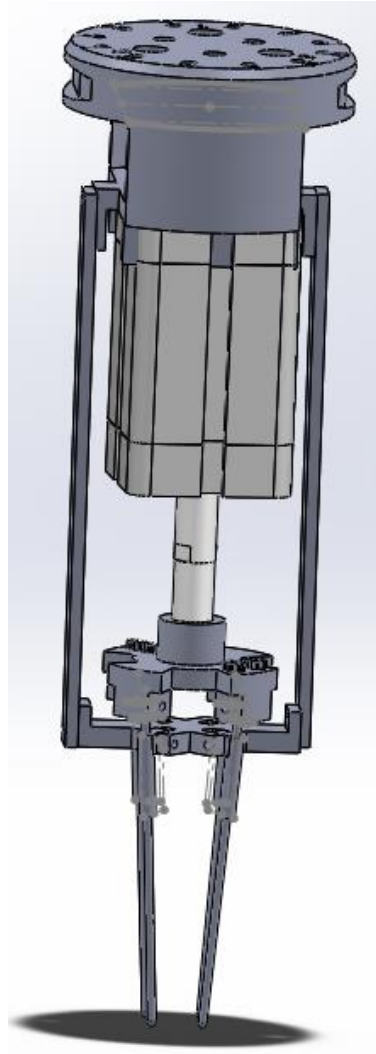
|    | Fecha      | Número de intentos |    |    |    |    |    |    |   |
|----|------------|--------------------|----|----|----|----|----|----|---|
|    |            | 1                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8 |
| 1  | 2/04/2018  | C                  | FP | FP | C  | FP | C  | C  | C |
| 2  | 3/04/2018  | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | FP | C |
| 3  | 5/04/2018  | C                  | C  | C  | FP | C  | C  | FP | C |
| 4  | 6/04/2018  | FS                 | FP | C  | C  | FP | C  | FP | C |
| 5  | 9/04/2018  | C                  | C  | C  | FP | C  | FP | C  | C |
| 6  | 10/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | FP | C  | C  | C |
| 7  | 11/04/2018 | Fci                | FP | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 8  | 12/04/2018 | FP                 | FP | C  | FP | C  | C  | FP | C |
| 9  | 13/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 10 | 16/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 11 | 17/04/2018 | C                  | FP | C  | FP | C  | C  | C  | C |
| 12 | 18/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | FP | C  | C |
| 13 | 19/04/2018 | C                  | C  | FP | C  | C  | C  | C  | C |
| 14 | 20/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | FP | C |
| 15 | 23/04/2018 | Fci                | C  | FP | C  | FP | C  | C  | C |
| 16 | 25/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 17 | 26/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 18 | 27/04/2018 | C                  | FP | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 19 | 30/04/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | FP | C  | C |
| 20 | 2/05/2018  | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 21 | 3/05/2018  | C                  | C  | FP | C  | C  | C  | C  | C |
| 22 | 4/05/2018  | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 23 | 7/05/2018  | Fci                | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 24 | 8/05/2018  | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 25 | 9/05/2018  | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 26 | 10/05/2018 | C                  | C  | FP | C  | C  | C  | C  | C |
| 27 | 11/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | FP | C  | C |
| 28 | 14/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 29 | 15/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 30 | 16/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 31 | 17/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 32 | 18/05/2018 | Fci                | C  | C  | FP | C  | C  | C  | C |
| 33 | 21/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 34 | 22/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 35 | 23/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 36 | 24/05/2018 | C                  | C  | FP | C  | C  | C  | FP | C |
| 37 | 25/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |
| 38 | 28/05/2018 | C                  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C |

|    |            |     |   |    |   |    |    |   |   |
|----|------------|-----|---|----|---|----|----|---|---|
| 39 | 29/05/2018 | C   | C | C  | C | FP | C  | C | C |
| 40 | 30/05/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 41 | 31/05/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 42 | 1/06/2018  | Fci | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 43 | 4/06/2018  | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 44 | 5/06/2018  | C   | C | FP | C | C  | C  | C | C |
| 45 | 6/06/2018  | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 46 | 7/06/2018  | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 47 | 8/06/2018  | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 48 | 11/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 49 | 12/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 50 | 13/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 51 | 14/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 52 | 15/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 53 | 18/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 54 | 19/06/2018 | Fci | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 55 | 20/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 56 | 21/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | FS | C | C |
| 57 | 22/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 58 | 25/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 59 | 26/06/2018 | C   | C | FS | C | C  | C  | C | C |
| 60 | 27/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |
| 61 | 28/06/2018 | C   | C | C  | C | C  | C  | C | C |

## Anexo 03

### Diseño propio de herramienta para manipulación de plantines

Como parte del proyecto, diseñé una herramienta para la manipulación de plantines compatible con la estructura del robot. Esta herramienta (figura 1) se diseñó tomando como componentes principales la base de la herramienta (modelo descargado de la página del robot), cilindro compacto (modelo NDX-025-030-200 de la marca airtec) y un actuador (diseño propio) encargado de manipular los plantines. Para el diseño del actuador se consideró las dimensiones de la bandeja de trabajo (hoyos de 37 mm de diámetro) juntos con el movimiento deseado del actuador, todo esto reflejado en el análisis geométrico que se



*Figura 1. herramienta para manipulación de plantas.  
Fuente: Fuente propia.*



encuentra al final de este apéndice. Los planos del diseño de todas las piezas se encuentran en los anexos 4, 5, 6 y 7.

En la figura 2, se muestra el proceso de dimensionamiento de las áreas de apertura y cerrado del actuador, donde “Radio Base” muestra el radio de la pieza base de la herramienta, luego en la pieza “Pinza” muestra la posición inicial de las pinzas antes de ingresar al sustrato de los plantines y que, en la última figura de la secuencia, muestra el área final de cierre de la herramienta, cuyo radio es de 10.29 m.m. En la parte de la derecha se muestran unas circunferencias, las cuales nos indica el diámetro del hoyo de la bandeja, el diámetro inicial cuando la herramienta se ubica sobre el sustrato y finalmente el diámetro final de cierre de la herramienta al sujetar al plantin. A continuación, se detalla cada una de las piezas del actuador:

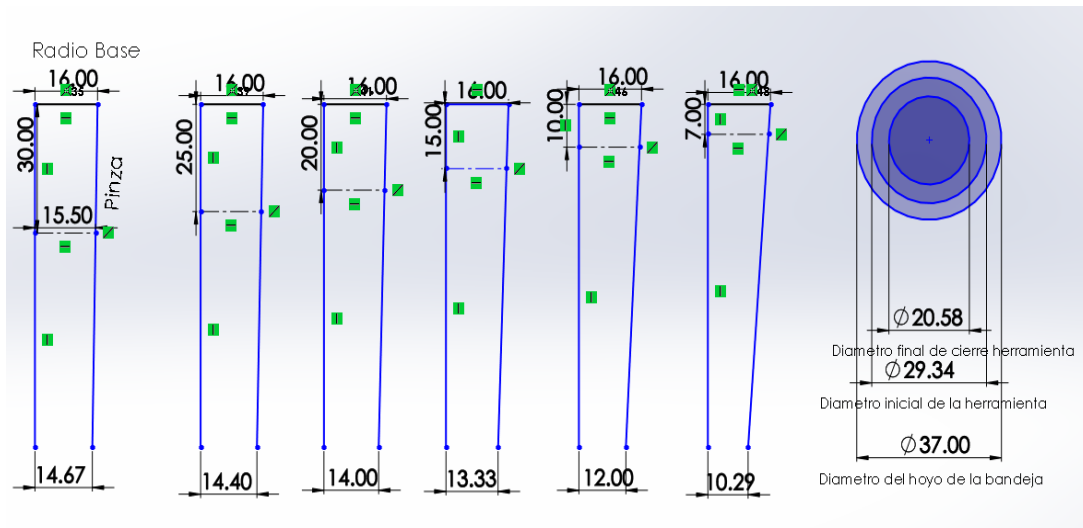


Figura 2. Dimensionamiento de los radios de apertura y cerrado de la herramienta.

Fuente: Fuente propia.

## 1. Piezas

- **Pieza “Base”:** Bajo las condiciones anteriores, se diseña la estructura mostrada en la figura 3, cuya estructura parte de un diseño circular, distribuyendo los ejes o pinzas de soporte en las posiciones de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$  respectivamente, esto para que las fuerzas producidas al ingresar al sustrato sean divididas por toda el área de la base. Todo el dimensionamiento de esta pieza se encuentra a detalle en el anexo 4 del presente informe.

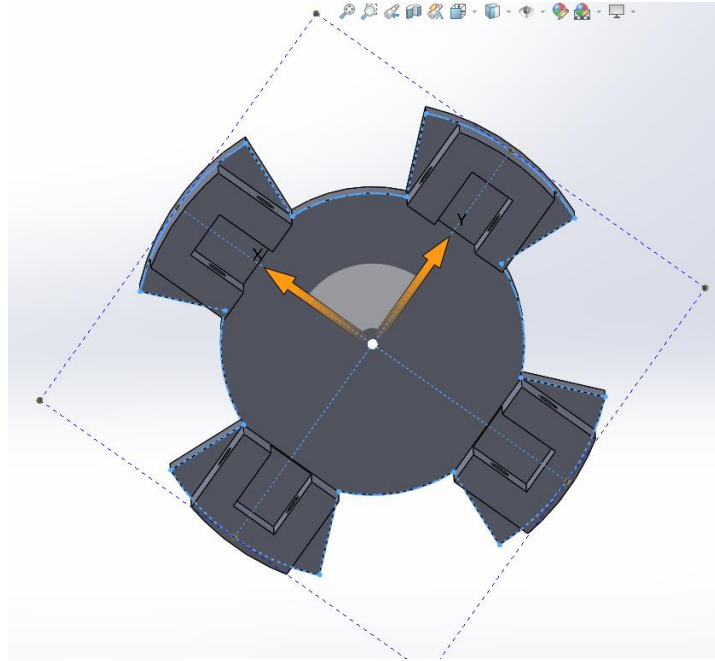


Figura 3. Pieza Base de la nueva herramienta desde una vista inferior.  
**Fuente:** Fuente propia.

- **Pieza “Pinzas”:** Estas pinzas (Figura 4) estarán sujetadas a la pieza “Base” de manera que puede tener movimiento en 1° de libertad, estas serán producidas en una impresora 3D para las pruebas del prototipo, ya que de acuerdo con el trabajo realizado se pueda cambiar de material a una más resistente, tomando en cuenta las condiciones

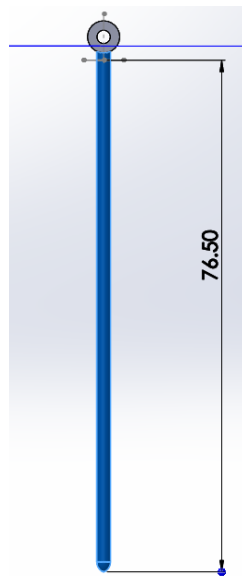
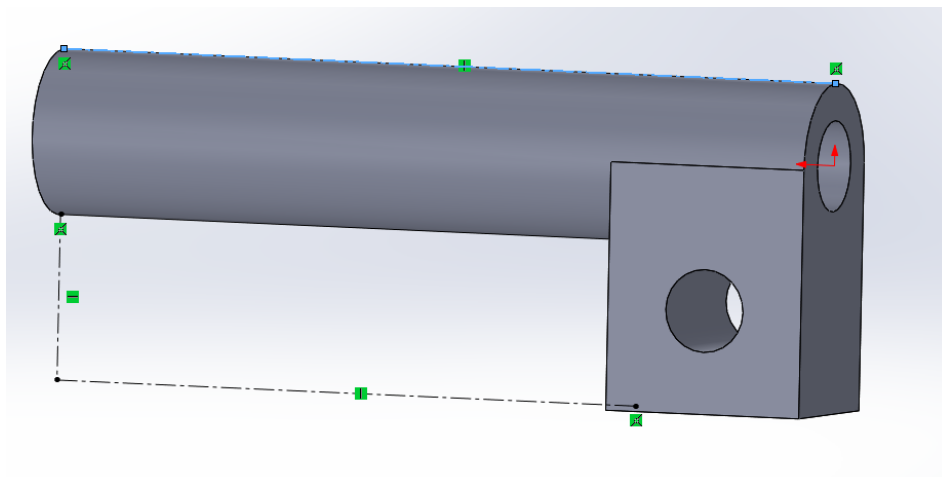


Figura 4. Pinzas que sujetaran al plantín.  
**Fuente:** Fuente propia.

ambientales y de trabajo. Tiene un largo de 76.50 mm de los cuales 30 mm a 25mm ingresarán a la tierra para extraer planta, estas distancias son tomadas de la bandeja de plantas con las que actualmente estamos trabajando (12 x 6 hoyos) y puede ser modificado de acuerdo con la nueva bandeja a trabajar. Toda la información detallada de las pinzas se encuentra detallada en el anexo 5.

- **Pieza 3 “soporte de pinzas”**: Esta pieza (figura 5) estará sujeta a la segunda base (figura 6), esta segunda base llamada de sujeción se encontrará a 30 mm de la primera base y servirá como tope al movimiento del cilindro neumático. Esta pieza estará unida de manera fija a la base del cilindro neumática y se encargará de darle soporte y fuerza a las pinzas para atravesar la tierra y sujetar el plantín de la bandeja. Los detalles de esta pieza se encuentran en el anexo 6 del presente informe.



*Figura 5. Soporte de las pinzas que se encuentran en la segunda base “Base de Sujeción”  
Fuente: Fuente propia.*

- **Pieza 4 “Base de Sujeción”**: Esta base (figura 6) se encuentra a 30 mm de la “Base” que servirá de soporte al movimiento de las pinzas, sobre esta pieza estarán puestos las piezas 3 para cada una de las 4 pinzas. Esta pieza estará unida de manera fija al cilindro neumático que otorgará el movimiento a esta herramienta. Todas las dimensiones de esta pieza se encuentran en el anexo 7 del presente informe.

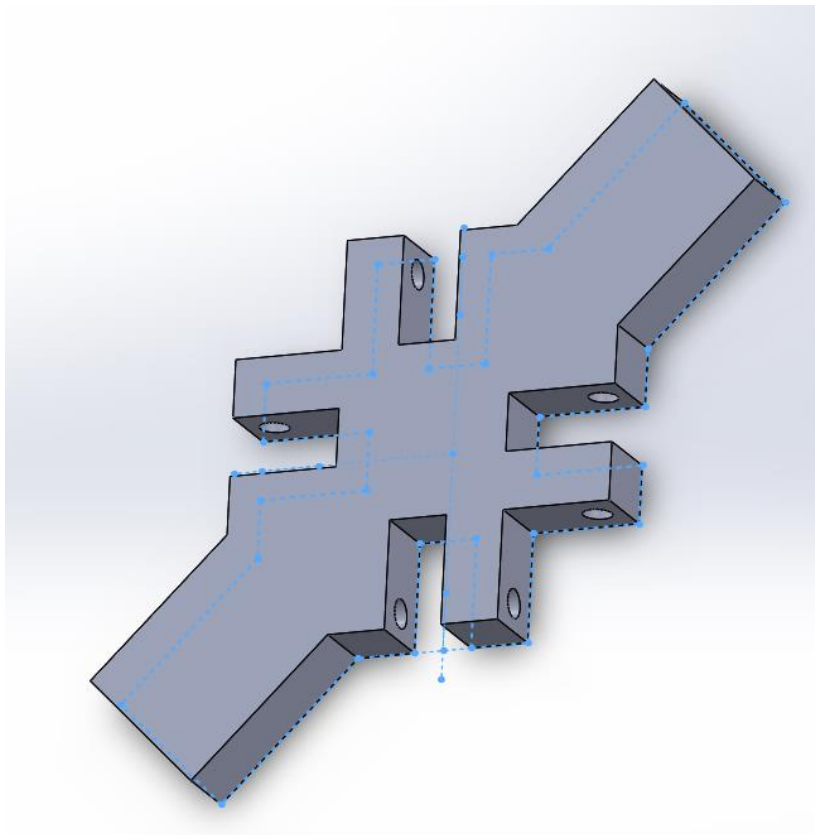


Figura 6. Base de sujeción que permitirá el movimiento a la herramienta.  
**Fuente:** Fuente propia.

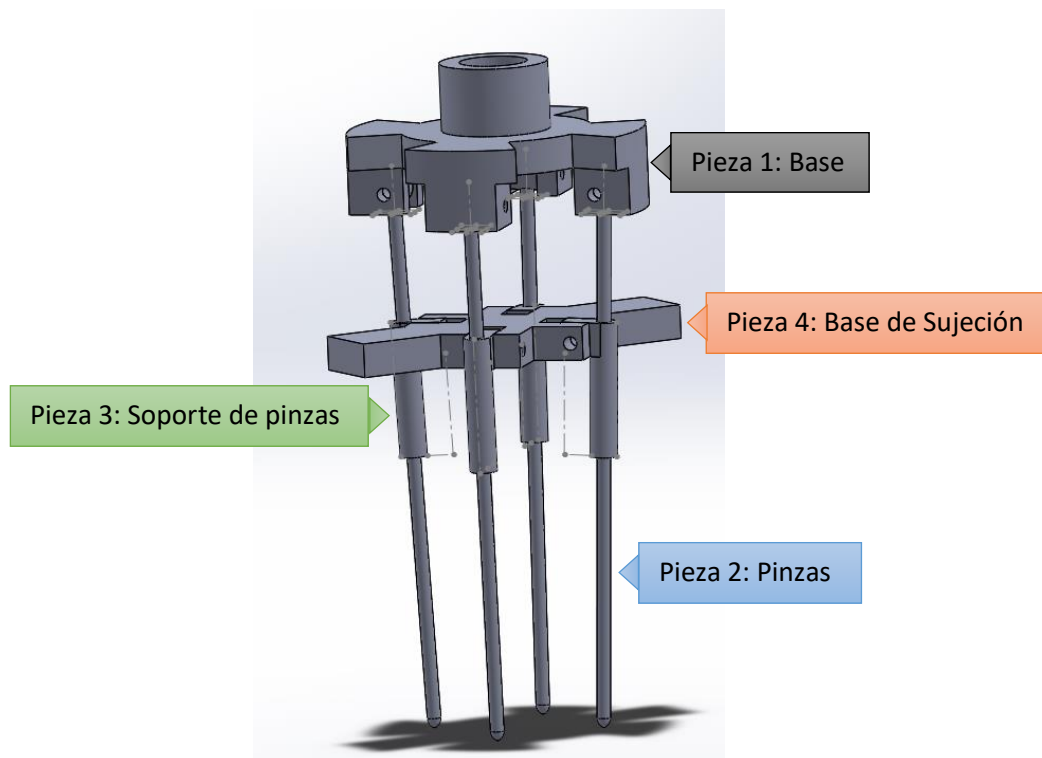


Figura 7. El actuador de la herramienta.  
**Fuente:** Fuente propia.

En la figura 7 se muestra a detalle la estructura del actuador de la herramienta propuesta para este proyecto, cuyo movimiento que realizará está mostrado en la figura 8.

En conclusión, se diseñó el modelo de la herramienta de manera satisfactoria, el cual se viene implementando y realizando las pruebas debidas al prototipo de esta herramienta.

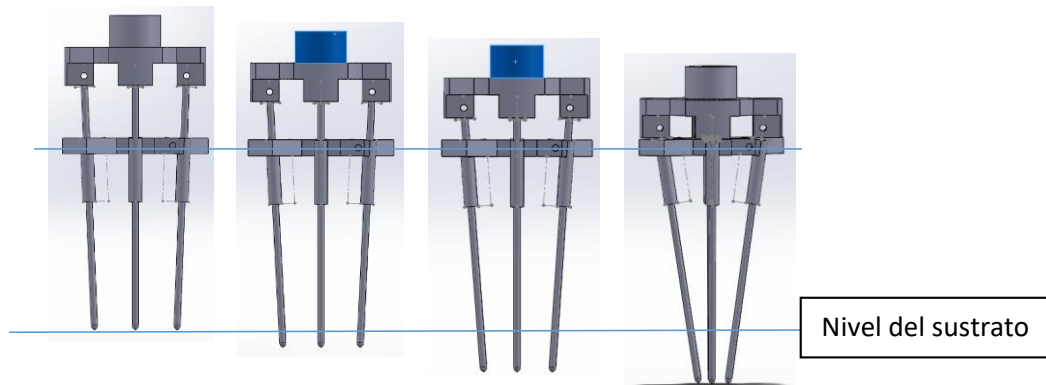


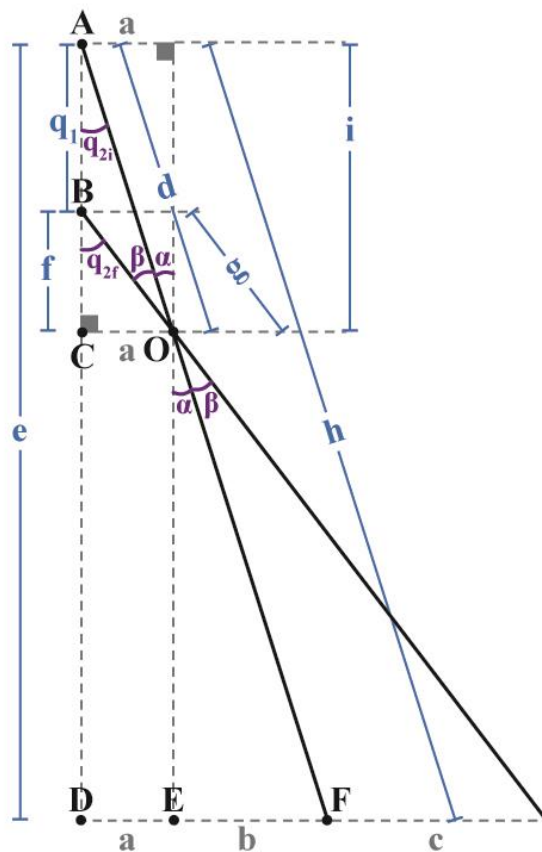
Figura 8. Funcionamiento del actuador.  
Fuente: Fuente propia.

Este diseño puede cambiar de acuerdo con el entorno de trabajo y/o problemas de diseño al acoplar las nuevas piezas como el actuador neumático y la pieza que va a ir a bandeja de herramientas del robot.

Para encontrar la relación que existe en el movimiento lineal del cilindro neumático, con respecto al movimiento angular de las pinzas, se desarrolla el método geométrico de la cinemática directa, que mediante relaciones geométricas obtenemos la posición final del actuador, el cual presenta el siguiente resultado.

## 2. Método Geométrico

Para encontrar una relación entre el movimiento angular que realizan las pinzas, producido por el movimiento línea del actuador neumático, se establecen que la posición inicial estará reflejada por el valor de  $(q_{2i})$  y la posición final será reflejada en el valor de  $(q_{2f})$ .



El ángulo ( $q_{2i}$ ) es fijo por la disposición de la estructura de la herramienta, por ende, los valores de:  $h = 80 \text{ m.m.}$  ;  $i = 30 \text{ m.m.}$  y  $a = 0.5 \text{ m.m.}$  también son fijos. En el triángulo ACO podemos obtener el ángulo ( $q_{2i}$ ) a través de la siguiente ecuación:

$$\tan(90 - q_{2i}) = \frac{i}{a} = \frac{30}{0.5} = 60$$

$$90 - q_{2i} = \tan^{-1} 60 = 89.0451^\circ$$

$$q_{2i} = 0.9548^\circ$$

Luego, para hallar el valor de  $a + b$  usamos el triángulo ADF:

$$\sin q_{2i} = \frac{a + b}{80}$$

$$\sin q_{2i} * 80 = a + b$$

$$a + b = 1.333 \text{ m.m.}$$

$$b = 0.833 \text{ m.m.}$$

En el triángulo BCO, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$g^2 = (g * \cos q_{2f})^2 + a^2$$

$$g^2(1 - \cos^2 q_{2f}) = a^2$$

$$g^2 = \frac{a^2}{(1 - \cos^2 q_{2f})}$$

Aplicando las leyes de cosenos en el triángulo ACO:

$$g^2 = 30^2 + q_1^2 - 2 * 30 * q_1 * \cos q_{2i}$$

Reemplazando los valores de  $g^2$  y a, tenemos

$$\frac{a^2}{(1 - \cos^2 q_{2f})} = 900 + q_1^2 - 59.9916 * q_1$$

$$\frac{0.249875}{(1 - \cos^2 q_{2f})} = 900 + q_1^2 - 59.9916 * q_1$$

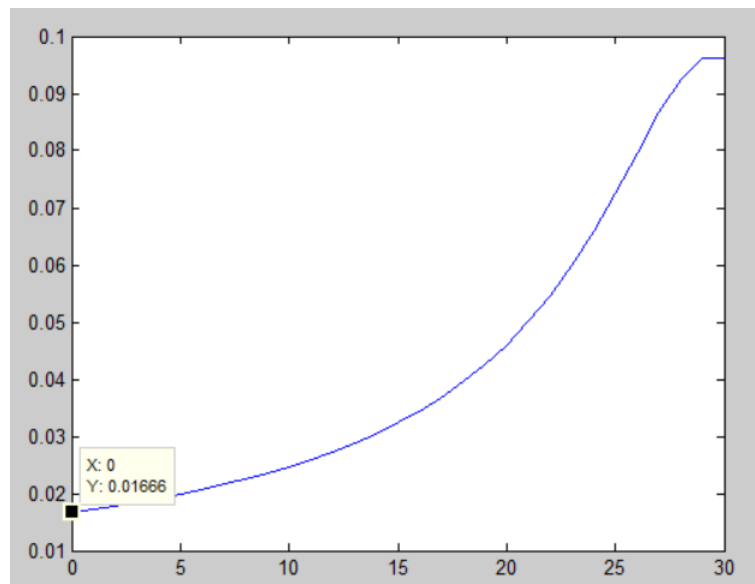
$$(1 - \cos^2 q_{2f}) = \frac{0.249875}{900 + q_1^2 - 59.9916 * q_1}$$

$$\cos^2 q_{2f} = 1 - \frac{0.249875}{900 + q_1^2 - 59.9916 * q_1}$$

$$\cos q_{2f} = \left(1 - \frac{0.249875}{900 + q_1^2 - 59.9916 * q_1}\right)^{0.5}$$

$$q_{2f} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.249875}{900 + q_1^2 - 59.9916 * q_1}\right)^{0.5}$$

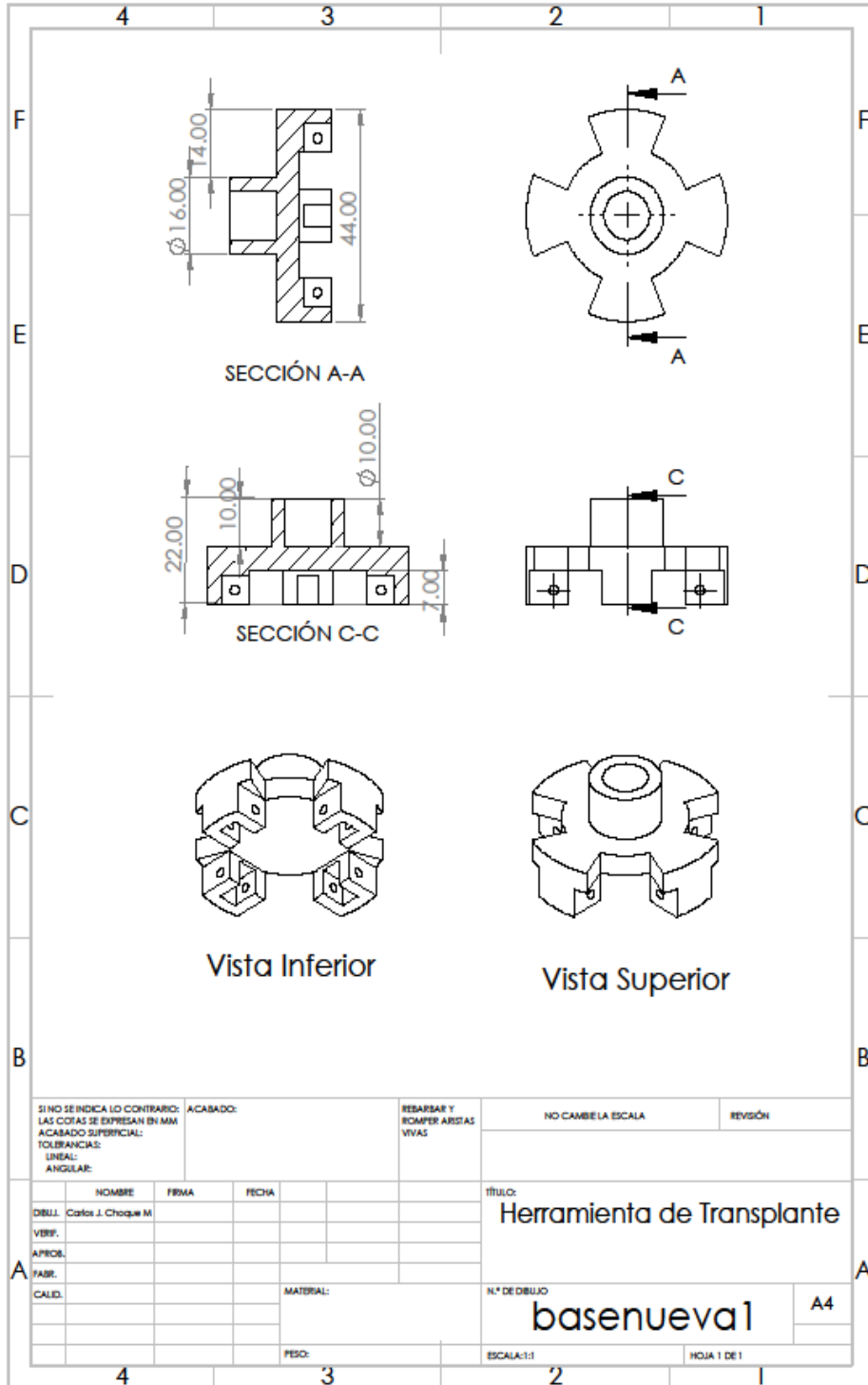
Luego, mediante el programa de Matlab, simulamos el comportamiento de la ecuación anterior con los valores de  $q_1 = 0$  al 30, obteniendo la siguiente gráfica:



En el gráfico podemos observar que entre los de valores de  $0 < x(q_1) < 30$ , los valores de  $x(q_{2f})$  se comportan de manera exponencial, iniciando con un valor de 0.0166 radianes ( $0.9511^\circ$ ) cuando  $x(q_1) = 0$ , que coincide con el valor inicial de  $q_{2i}$  en el análisis geométrico.

# Anexo 04

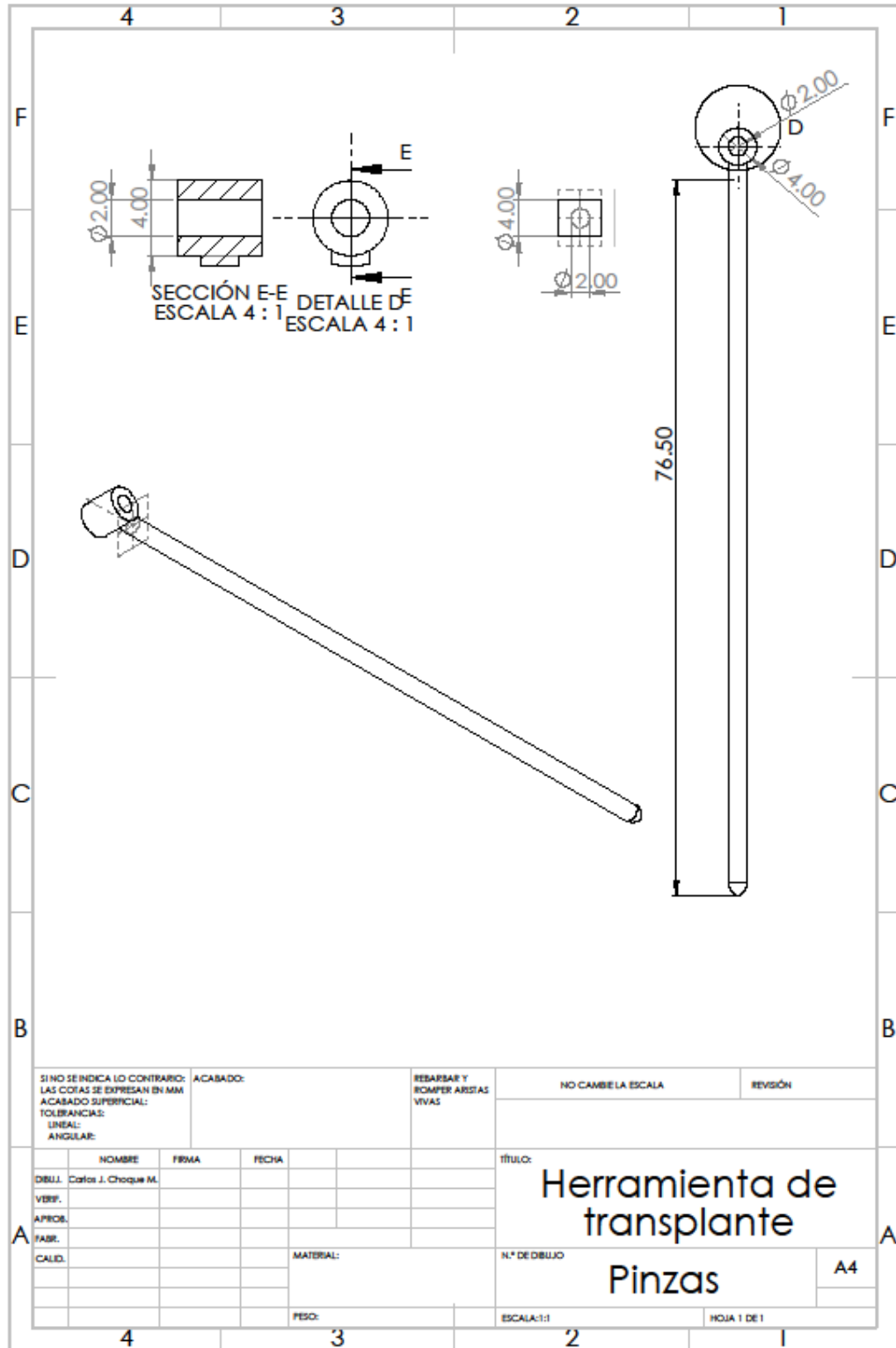
## Planos de la pieza BASE





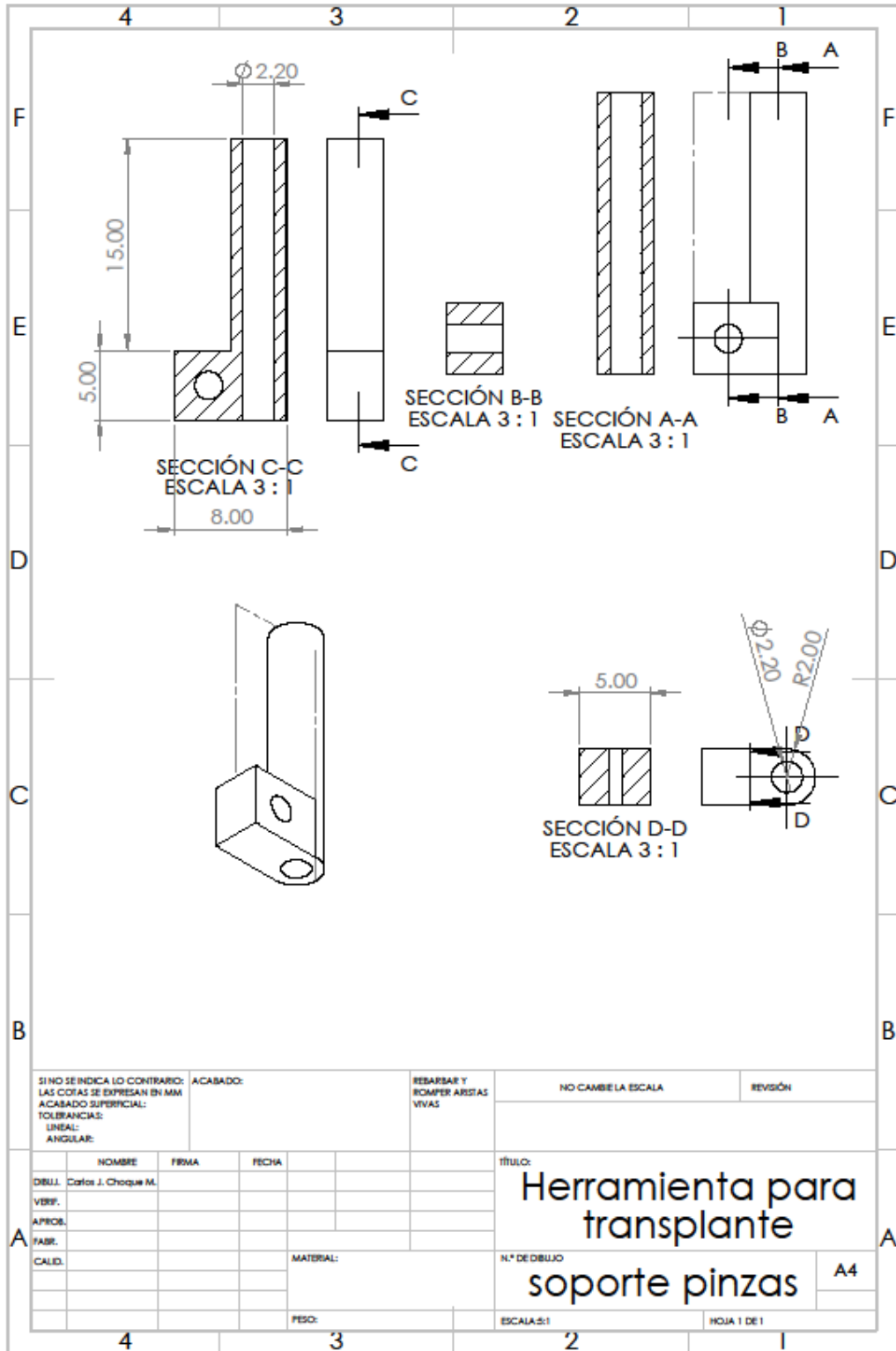
## Anexo 05

Planos de la pieza PINZAS



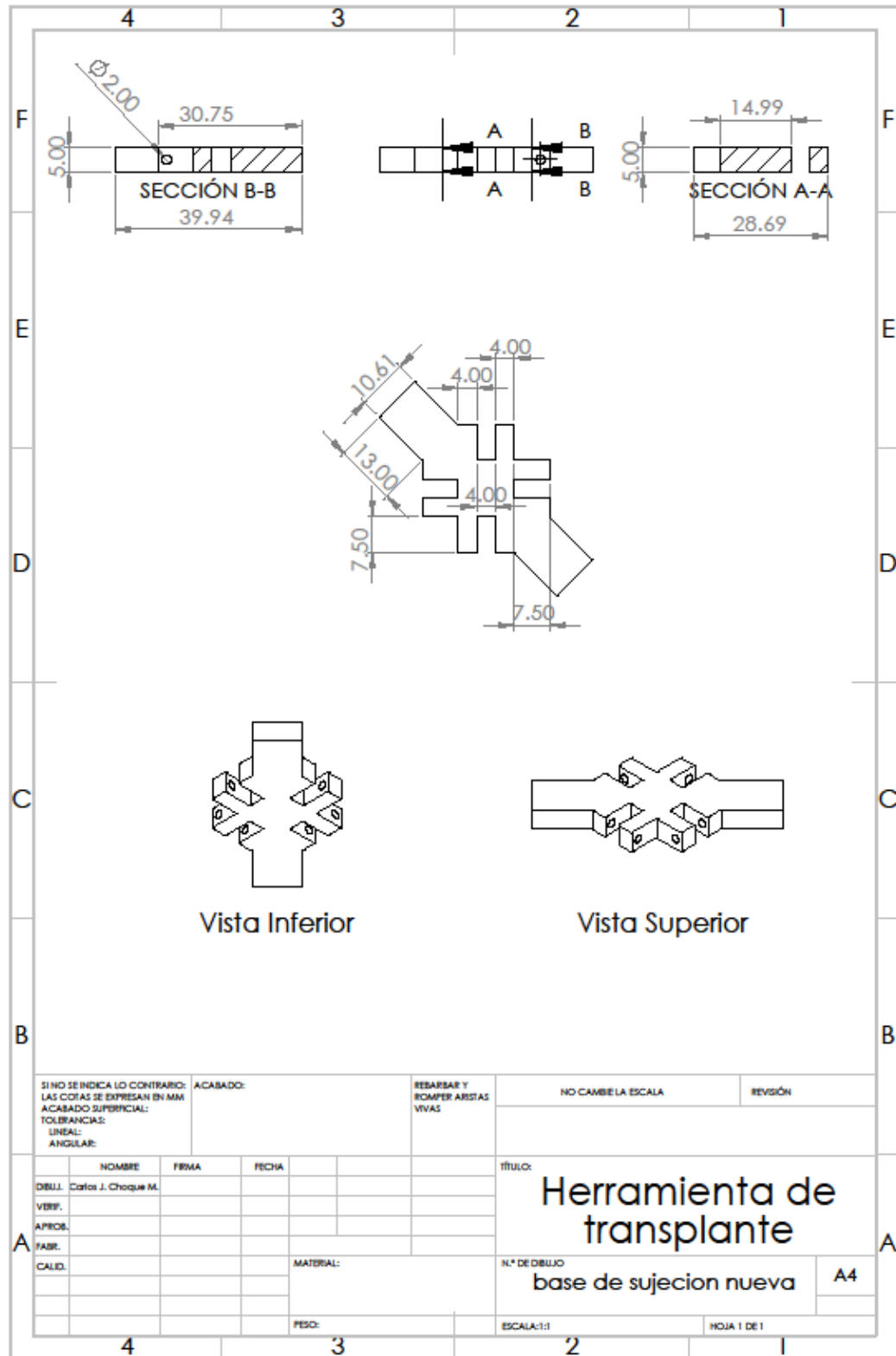
## Anexo 06

Planos de la pieza SOPORTE DE PINZAS



## Anexo 07

Planos de la pieza BASE DE SUJECION



## Anexo 08

Resolución Rectoral N 4231-2017-R-UPAO



### UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO RESOLUCIÓN RECTORAL N° 4231-2017-R-UPAO

Trujillo, 26 de setiembre de 2017

**VISTO**, el Oficio N° 430-2017-VIN-UPAO del Vicerrectorado de Investigación, sobre propuesta de desarrollo del proyecto de investigación e innovación “Desarrollo y construcción de un sistema robotizado para optimizar el repique de plantines en viveros industriales de la Región La Libertad - Perú” y;

#### **CONSIDERANDO:**

Que mediante Oficio N° 430-2017-VIN-UPAO, el señor vicerrector de investigación ha tramitado la Resolución Vicerrectoral N° 55-2017-VIN-UPAO, mediante la cual autoriza, en esa instancia, el desarrollo del proyecto de investigación e innovación “Desarrollo y construcción de un sistema robotizado para optimizar el repique de plantines en viveros industriales de la Región La Libertad - Perú”, con su presupuesto respectivo; asimismo, señala que el proyecto cuanta con la opinión favorable de la Oficina de Investigación, Ciencia y Tecnología, según Oficio N° 108-2017-OICYT-UPAO, por tratarse del primero que es presentado por un grupo de investigación formalmente constituido en nuestra Universidad;

Que la Alta Dirección ha estimado conveniente para los objetivos académicos y de investigación institucional, autorizar la propuesta en los términos formulados;

Estando a las razones expuestas y en ejercicio de las atribuciones legales conferidas al Rectorado por el artículo 42°, numerales 1 y 2, del Estatuto de la Universidad;


#### **SE RESUELVE:**

**Primero.- AUTORIZAR** el desarrollo del proyecto de investigación e innovación “Desarrollo y construcción de un sistema robotizado para optimizar el repique de plantines en viveros industriales de la Región La Libertad - Perú”, con su presupuesto respectivo, conforme a los documentos adjuntos a la Resolución Vicerrectoral N° 55-2017-VIN-UPAO, que hace cuerpo con la presente resolución.

**Segundo.- DISPONER** el egreso económico de S/ 28,650.00 para cubrir los gastos que demande el presupuesto de ejecución, el mismo que se entregará al Dr. Sixto Prado Gardini, con cargo a rendir en 2 armadas, la primera de S/ 19,500.00 y la segunda de S/ 9,150.00 a la entrega de un informe técnico financiero; afectándose a la partida presupuestaria prevista en el Fondo 99, Organización 71, Programa 000014, Actividad 140318, y Cuentas que correspondan.

**Tercero.- ENCARGAR** a las Oficinas de Asesoría Jurídica y Contabilidad, realizar las coordinaciones pertinentes con el Vicerrectorado de Investigación, para ejecutar lo dispuesto en la presente resolución.

**REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE.**

  
Dra. FELICITA YOLANDA PERALTA CHÁVEZ  
Rectora

  
Dr. SANTIAGO ALEJANDRO VÁSQUEZ GARCÍA  
Profesor Secretario General