



**Desarrollo e implementación de una máquina (CNC) para la gestión automática de cultivo
y riego de un huerto dentro de un hogar basado en la propuesta de Farmbot**

Edier Alexander Sánchez Morales

10441411592

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

Desarrollo e implementación de una máquina (CNC) para la gestión automática de cultivo y riego de un huerto dentro de un hogar basado en la propuesta de Farmbot

Edier Alexander Sánchez Morales

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director (a):

Ph.D Sergio Andrés Díaz Salas

Líneas de Investigación:

Sistemas digitales-Robótica agroindustrial-Microcontroladores

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
Desarrollo e implementación de una máquina (CNC) para la
gestión automática de cultivo y riego de un huero dentro de
un hogar basado en la propuesta de Farmbot,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingeniero Electrónico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, 2023

Contenido

Pag.

1.	Capítulo 1: Introducción	14
1.1	Problemática	14
1.2	Antecedentes	15
1.3	Justificación	20
1.4	Alcance	21
1.5	Objetivos	21
2.	Capítulo 2: Marco teórico.....	22
2.1	Requerimientos generales	22
2.2	Sistema de control	24
2.3	Componentes constituyentes del prototipo	24
2.3.1	Especificaciones técnicas del hardware	25
2.4	Software y firmware	32
2.4.1	Marlin y Sprinter	33
2.4.2	Arduino y Ramps V1.4	33
2.4.3	Raspberry Pi 3	33
3.	Capítulo 3: Metodología.....	34
3.1	Diseño CAD	34
3.1.1	Estructura y ejes	35
3.1.2	Platos de desplazamiento	37
3.1.3	Herramientas intercambiables (HIM) y soportes	41
3.2	Ensamble general	46
3.2.1	Reutilización código fuente Marlin/Sprinter para efectos de calibración ..	47
3.2.2	Configuración de movimiento y velocidad de los motores	47
3.3	Determinación de frecuencia de riego en función al tipo de semilla (planta) y condiciones climáticas	49
3.4	Requerimientos de la aplicación agroindustrial	50
3.5	Condiciones climáticas de la zona de implementación del prototipo	51
3.6	Instalación	52
4.	Capítulo 4: Resultados.....	53
4.1	Validación numérica de los resultados obtenidos del funcionamiento del prototipo de la máquina	53
4.1.1	Comprobación de error de desplazamiento en los ejes	55
4.1.2	Censado de humedad	58
4.1.3	Censado de temperatura en motores paso a paso eje X, Y y Z	59
4.1.4	Profundidad de plantado en tierra con características diferentes	61
5.	Conclusiones.....	65
6.	Referencias Bibliográficas.....	67

Índice de Figuras

Figura 1:	Ruta y movimiento del efector Farming Bot	16
Figura 2:	Principio de funcionamiento de una máquina CNC	19
Figura 3:	Funcionamiento de un sistema CNC.....	20
Figura 4:	Tarjeta Ramps V1.4	26
Figura 5:	Motor paso a paso Nema 17.....	27
Figura 6:	Controladores A4988 y DRV8825.....	27
Figura 7:	Electroválvula Solenoide	28
Figura 8:	Bomba de vacío.....	29
Figura 9:	Interruptor - Final de carrera EndStop.....	29
Figura 10:	Sensor de humedad capacitivo Gikfun Ek1940	30
Figura 11:	Diseño CAD del prototipo	35
Figura 12:	Perfil de aluminio estructural V-slot 2040.....	36
Figura 13:	Perfil de aluminio estructural V-slot 2060.....	36
Figura 14:	Perfil de aluminio estructural V-slot 2020.....	37
Figura 15:	Plato de desplazamiento eje X	38
Figura 16:	Plato de sujeción entre eje Y y eje X	39
Figura 17:	Plato de desplazamiento y sujeción entre eje Z y eje Y.....	40
Figura 18:	Soporte de sujeción eje Z.....	41
Figura 19:	Herramienta de montura universal (HIM) parte superior	42
Figura 20:	Herramienta de montura universal (HIM) parte inferior	43
Figura 21:	Herramienta de montura de censado.....	43

Figura 22:	Herramienta de montura de agua parte superior	44
Figura 23:	Herramienta de montura de agua parte inferior	45
Figura 24:	Herramienta matricial semillero	45
Figura 25:	Herramienta de montura de inyección de semillas	46
Figura 26:	Prototipo instalado en casa.....	47

Índice de Tablas

Tabla 1:	Requerimientos generales del prototipo.....	23
-----------------	---	----

Tabla 2:	Lista de materiales	24
Tabla 3:	Características de controladores A4988 y DRV8825	27
Tabla 4:	Características de sensor de humedad Ek1940	30
Tabla 5:	Conexiones electrónicas para herramienta universal de montura.....	31
Tabla 6:	Códigos G de desplazamiento.....	32
Tabla 7:	Códigos G para parámetros de posición Endstop	32
Tabla 8:	Configuración de micro pasos para motores bipolares	48
Tabla 9:	Determinación de humedad según el estado del suelo.....	50
Tabla 10:	Tipos de cultivos seleccionados.....	50
Tabla 11:	Error de desplazamiento en configuración 1600 pasos.....	56
Tabla 12:	Error de desplazamiento en configuración 3200 pasos.....	56
Tabla 13:	Error de profundidad de plantado en tierra con humedad de 75%-85%	63
Tabla 14:	Error de profundidad de plantado en tierra con humedad de 25%-35%	63

Índice de Gráficas

Gráfica 1:	Humedad relativa del lugar de instalación del prototipo	51
Gráfica 2:	Temperatura del lugar de instalación del prototipo	52

Gráfica 3:	Desplazamiento en eje X del prototipo	53
Gráfica 4:	Desplazamiento en eje Y del prototipo	54
Gráfica 5:	Desplazamiento en eje Z del prototipo	54
Gráfica 6:	Lecturas de humedad en tierra	58
Gráfica 7:	Temperatura en los motores del eje X	59
Gráfica 8:	Temperatura en motor del eje Y	60
Gráfica 9:	Temperatura en motor del eje Z.....	60
Gráfica 10:	Profundidad de plantado en tierra con humedad de 75-85%	62
Gráfica 11:	Profundidad de plantado en tierra con humedad de 25-35%	62

Resumen

En el presente trabajo de grado se plantea la construcción de una máquina CNC de tipo cartesiano que tiene movimiento en los ejes X, Y y Z basado en el robot Farmbot, que busca realizar la gestión automática de tareas como riego y cultivo de plantas, esto en base a la constante

búsqueda de nuevos modelos en la agricultura urbana que expongan una mejor eficiencia en área de cultivo, control, producción y se plantea como una alternativa en consecuencia a la disminución de terrenos cultivables por la alteración de zonas agrícolas que se han convertido en áreas residenciales, urbanas y/o de crecimiento industrial. El desarrollo de esta máquina CNC se enfoca en la elaboración e implementación en un huerto en casa a partir de tecnología Open Source, partiendo desde sus componentes electrónicos, firmware, hardware y su estructura metálica. Finalmente se espera que el proyecto permita formar parte del sector de la agroindustria y/o sirva como alternativa para formar parte del sector urbano.

Palabras clave: (Máquina CNC, Open Source, Agricultura de precisión, Farmbot, Movimiento cartesiano).

Abstract

The current degree document is proposed the construction of a cartesian-type CNC machine that has movement in the X, Y and Z axes based on the Farmbot robot, which seeks to carry out the automatic management of tasks such as irrigation and plant cultivation, this is based

on the constant search for new models in urban agriculture that expose better efficiency in the area of cultivation, control, production and considers itself as an alternative accordingly to the decrease in arable land due to the difference in agricultural areas that have been converted into residential, urban and and/or industrial growth areas. The development of this CNC machine focuses on the development and implementation in a home garden from Open-Source technology, starting from its electronic components, firmware, hardware and its metal structure. Finally, it is expected that the project will make it possible to form part of the agribusiness sector and/or serve as an alternative to form part of the urban sector.

Keywords: Cartesian-type CNC machine, Open -Source, Precision Agriculture, Farmbot, Cartesian movement

1. Capítulo 1: Introducción

1.1 Problemática

De acuerdo con el Atlas de Expansión Urbana en Colombia, en los últimos 20 años se ha presentado un crecimiento urbanístico al 3% y donde el aumento de la cantidad del suelo convertido a uso urbano ha ocasionado un incremento en hectáreas construidas y, que supera el 5% como en Barranquilla, Cali, Bogotá, Medellín, Pereira, Cartagena, Bucaramanga y Cúcuta donde se pasó de 4.000 a 9.953 hectáreas construidas en las últimas dos décadas (Julián Vivas,

2017). Este factor ha conseguido una alteración y modificación rural debido a que zonas agrícolas se han convertido en áreas residenciales, urbanas y de crecimiento industrial.

En consecuencia, a la expansión constante de hectáreas urbanas se obtiene una disminución de terrenos cultivables que ponen en riesgo la seguridad alimentaria familiar. La prevención de la inseguridad alimentaria se ha atacado gracias al desarrollo de sistemas como huertos urbanos, familiares y comunitarios donde el enfoque es la producción de alimentos que mantengan una sostenibilidad ambiental. Cuidar un huerto puede ser una actividad que consuma mucho tiempo debido a las múltiples tareas que se deben realizar, como la eliminación de maleza, el suministro de agua y la prevención de plagas, lo que se considera uno de los inconvenientes principales, por lo tanto estos factores desencadenaron el desarrollo de robots orientados a la agricultura que faciliten labores como se reporta en (Guerra & Hernan, 2019) y en como el crecimiento de las ciudades ha ocasionado que se busquen nuevos modelos en el agro que ayuden a combatir la seguridad alimentaria y aumentar la calidad de vida.

1.2 Antecedentes

La robótica y los sistemas autónomos (RAS) tienen una gran acogida e impacto en las industrias puesto que tienen como objetivo aumentar la eficiencia en ciertas tareas, estas tecnologías tienen mayor aceptación en muchos sectores y algunos como: telefonía, automóviles y agrícola, este último es un sector que se ha popularizado, puesto que para la producción de alimentos se necesitan personas que estén acompañando activamente el proceso de cultivo, cuidado de las semillas y plantas. La robótica ha perseguido el objetivo de sustituir a un operario humano en distintivas tareas que de alguna manera resultan tediosas o repetitivas y, como resultado de esta tendencia, se ha fomentado el desarrollo de la agricultura urbana (AU), la cual comprende diversos tipos de huertos y tiene como objetivo la producción de alimentos en cualquier espacio disponible. (Guadalupe Hernández Campuzano, 2014).

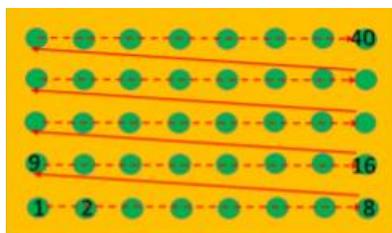
En cuanto a las tecnologías de código abierto que han tomado bastante popularidad tanto para principiantes como para expertos debido a la existencia de guías, foros y demás medios para aprender a usar y aplicar en distintas áreas donde se acoge el término de “diseños universales”, que en pocas palabras son diseños aplicados para diversos usos. (Şahin Bülbül, 2017) En primer los autores desarrollan un “robot agrícola” en Indonesia basado en un mecanismo CNC con el objetivo de desarrollar una granja inteligente haciendo hincapié en el proceso del cultivo

automático de plantas, en principio hacen uso de: (S. Suakanto & M. Hutagalung and D. Angela, 2016)

- Tecnología de código abierto (open source).
- Robótica.

El uso de robots en ámbitos agro-urbanos se está transformando en una solución eficaz y popular para su utilización en huertos familiares, urbanos y como en (Ahmad, n.d.). ¿Por qué?, porque hay diferentes tipos de plantas que pueden ser cosechados entre 28 a 32 días, sin embargo, existen numerosas opciones de plantas que se pueden cultivar, dependiendo de factores como la ubicación, el clima y el tipo de suelo. Farmbot actualmente tiene un soporte de hasta poder sembrar 33 tipos de hortalizas en el mismo huerto como lo reportan los creadores de Farmbot en (Team Farmbot, n.d.-a), en el documento (Dwi Putro S. Setyohadi et al., 2020) el autor implementa una máquina usando tecnología CNC de código cerrado y utiliza un método personalizado para el movimiento del efector del bot basado en Farmbot como se observa en la figura 1 para sembrar las semillas de los vegetales.

Figura 1: Ruta y movimiento del efector Farming Bot



El método empleado en la figura 1 se destaca por el movimiento del efector final, que se lleva a cabo dentro de una posición matricial numerada. Cada número representa una planta ubicada en una sección que puede ser manipulada mediante este método, lo que resulta conveniente para realizar un seguimiento de cada una de las plantas. (Rubio Salvador Pedro, 2017) y (Team Farmbot, n.d.-b).

Los autores de (Rubio Salvador Pedro, 2017) desarrollan un sistema mecatrónico que realiza el cultivo automático en un huerto, se enfocan en el movimiento automático del robot mediante instrucciones en código G-code y en la localización del huerto debido a que la electrónica de la máquina CNC no podía exponerse al aire libre por riesgos a daños debido a que no implementaron normativas IP67.

En la tesis (Mahmudul Hasan et al., 2017) los autores automatizan una parcela de cultivo mediante el empleo de máquinas CNC e impresoras 3D basada en un sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z y el cultivo integra tecnología IoT para la transmisión de información de factores como temperatura, humedad y en general información que es enviada mediante módulos GSM.

Los problemas más críticos a la hora del desarrollo de sistemas automatizados en huertos son el tipo de cultivo al que está dirigido, los cambios en el tipo de semillas que se va a cultivar repercute directamente en el funcionamiento de la máquina CNC (Es importante considerar que el riego de las plantas depende de varios factores, como el tipo de semilla, la edad de la planta, el tipo de vegetal, la humedad del suelo, la temperatura, la profundidad de siembra, entre otros), el autor de (Siddique et al., 2017) destaca la importancia y los beneficios de conectar un huerto en casa al Internet de las cosas (IoT) y automatizar estos procesos en los sistemas.

La robótica en la agroindustria

La robótica ha sido concebida para la realización de tareas que involucren algún peligro para el ser humano además de ser una de las áreas con mayor crecimiento debido a su utilización en áreas de automatización de procesos que impliquen eficiencia, influenciado por el constante progreso tecnológico, por lo tanto, una de las finalidades es intentar sustituir el trabajo físico o incluso intelectual del hombre (Ollero Baturone & Aníbal, 2001).

El empleo de la robótica en la agroindustria en temas de agricultura de precisión, maquinaria de autoguiado y máquinas cosechadoras tienen un alcance que es definido en proporción al tipo de tecnologías empleadas o procesos de producción (Guerra Enrique & Hernán Andrés, 2019).

Una de las técnicas para llevar a cabo el desplazamiento en desarrolladas es el Control Numérico Computarizado (CNC) operado mediante comandos Gcode, el Gcode es un lenguaje de programación usado en control numérico (CN) en el área de automatización de ingeniería asistida por computadora y algunas empresas como Siemens Sinumeric, FANUC y Heidenhain hacen uso de este tipo de dispositivos y programación, el Gcode en otras palabras permite dar instrucciones sobre cómo y hacia donde moverse y así mismo definir el tipo de trayectoria. El código Gcode es traducido por el actuador, por ejemplo, Arduino Mega con una tarjeta RAMPS y

mediante una carga previa de algún firmware que es utilizado para controlar máquinas CNC como lo son fresadoras e impresoras 3D.

En este sentido las máquinas CNC tienen como punto fuerte la precisión en sus movimientos, por lo tanto, este tipo de maquinarias CNC está teniendo un gran impacto en el área agroindustrial debido a sus múltiples aplicaciones como control de plagas, cobertura de área de arado, cultivo y siembra de alta precisión, forestación de precisión y manejo de macetas en invernaderos.(Guerra Enrique & Hernán Andrés, 2019)

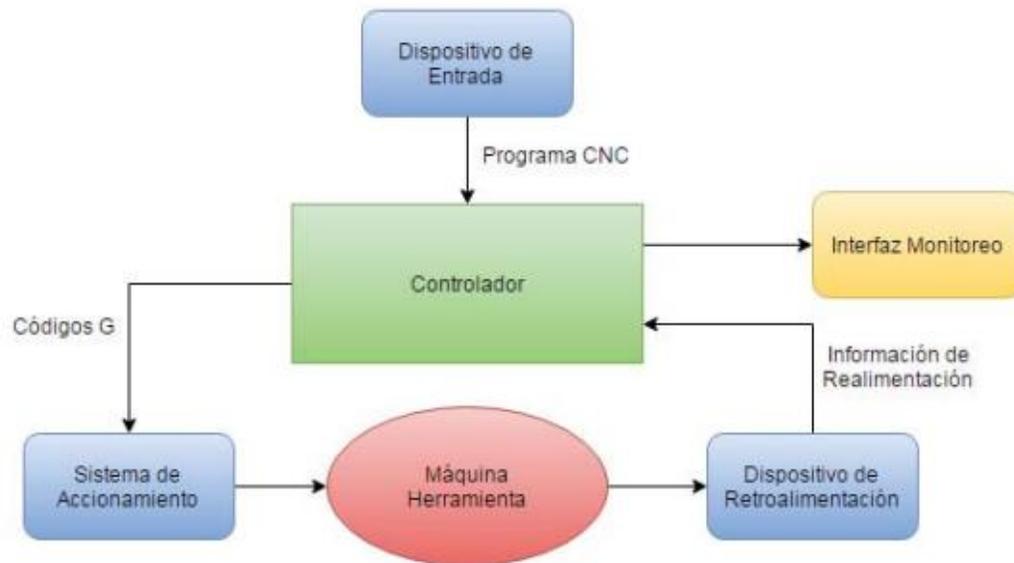
El control numérico computarizado o por computador es un dispositivo que tiene la capacidad de coordinar la posición en un plano definido por sus ejes previamente instalados en una estructura metálica. A su vez, las instrucciones son elaboradas y enviadas a través de un lenguaje de programación y un ordenador. Simultáneamente se utilizan los controladores en cada motor que permiten ejercer el cambio correspondiente de posición.

Existen ciertas ventajas de utilizar este tipo de tecnología CNC, por ejemplo, como se menciona en el trabajo integral (B. Marín Fabián, 2012), estos dispositivos tienden a salvaguardar la vida humana mediante su utilización para el trabajo con productos peligrosos o que representen un alto riesgo al manipularlos, y su diseño es altamente personalizable, permitiendo desde modelos simples hasta robustos.

El mercado está en una constante búsqueda de exigencia en cuanto a las especificaciones de las máquinas CNC y características de precisión, eficiencia y normalización, de igual forma repercute directamente en los altos costos de fabricación y, por esta razón impiden la adquisición de estos bienes.

Fundamentalmente el uso de estos dispositivos surge de manera comercial en la Guerra Fría en 1949 en donde se comienza el desarrollo de la automatización de procesos, como el aumento de productividad de palas para helicópteros y donde John T. Parsons trabajando con IBM investigó y desarrolló técnicas de control para el mecanizado del dispositivo, luego el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en 1958 se desarrolló una herramienta de corte definiendo los planos respecto al objeto o pieza de trabajo

Funcionamiento de las máquinas CNC

Figura 2: *Principio de funcionamiento de una máquina CNC*

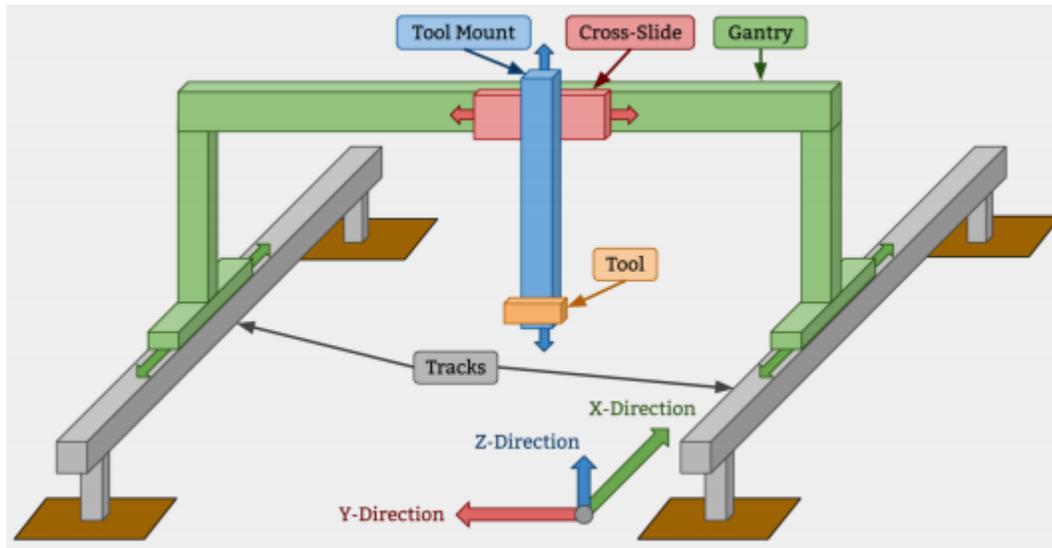
Las máquinas CNC por lo general se vuelven más complejas a medida que aumentan la cantidad de ejes, una máquina CNC cartesiana tiene tres ejes comunes y son un eje X, Y, y un eje Z que permite desplazarse verticalmente respecto al plano. El funcionamiento de la máquina consta de un controlador que recibe instrucciones mediante código Gcode los cuales se interpretan de modo que un actuador (sistema de accionamiento) debe realizar determinada acción, como, por ejemplo mover los motores que están ubicados en un eje preestablecido, también realimenta el controlador con datos como su posición, velocidad de movimiento para posterior ajuste además estas máquinas suelen contar con una interfaz de monitoreo que permite obtener información sobre parámetros como la velocidad, posición y temperatura que son datos utilizados comúnmente como realimentación. En La figura 2 se puede observar el funcionamiento básico de una máquina CNC.

Control numérico en la Agroindustria (Farmbot)

Farmbot es un robot CNC de agricultura de precisión, el robot CNC cuenta con líneas guías en los ejes X, Y, Z (figura 3) estos ejes se desplazan gracias a que el sistema se encuentra montado en perfiles de aluminio. Farmbot cuenta con herramientas como boquillas de riego, un sistema de

inyección de semillas y sensores estos van acoplados en la parte de “Tool Mount”. El sistema es numéricamente controlado y automatizado.

Figura 3: *Funcionamiento de un sistema CNC*



1.3 Justificación

Con el fin de generar alimentos y atacar la inseguridad alimentaria generada por áreas rurales urbanizadas, el proyecto del desarrollo de un sistema CNC que automatice tareas como cultivo y riego en un huerto en casa, puede ser una solución viable porque fomenta la agricultura urbana con la producción de alimentos en pequeñas parcelas, y que también impulsa la adopción de tecnologías agrícolas avanzadas.

Otro punto a favor es que aporta alimentos sanos y contribuye a una alimentación sana como se manifiesta en (Joan Camilo Gómez, 2018). Aportan a la economía del grupo familiar en cuanto al uso de fuentes y como productor de alimentos, dichas huertas familiares son relevantes en centros de producción para las comunidades rurales, urbanas y familiares (Engels, 2002).

En el documento (Mahmudul Hasan et al., 2017) se especifica que la implementación de sistemas IoT y desarrollo de sistemas automatizados contribuyen a generar características de acceso remoto haciendo uso de servidores web, que permiten visualizar el estado de la máquina en cualquier lugar con acceso a internet, sin embargo, se requiere el uso de un computador con buenas prestaciones configurado como un servidor de datos.

La utilización de tecnología moderna de cultivos de vegetales es muy eficiente en términos de tiempo y energía debido a la utilización de tecnología CNC además de las posibilidades de adaptar los algoritmos desarrollados para diferentes cultivos de vegetales como se reporta en (Dwi Putro S. Setyohadi et al., 2020) , es decir; un operario humano no tendrá que estar constantemente pendiente del cultivo y riego de cada planta puesto que el robot automatiza estos procesos, otro de los factores es que se aprovecha mejor el área de cultivo como ocurre en (R. Landon Aronson, 2013) donde se incrementa hasta en un 12% el área para cultivar, además estos proyectos en el agro pueden reducir o minimizar los costos de mano de obra como ocurre en (Dwi Putro S. Setyohadi et al., 2020) y (Team Farmbot, n.d.-a) respecto a implementar el proyecto como una tendencia en la industria. Otro de los puntos favorables es la facilidad de conseguir materiales debido a la inclusión en su totalidad al Open Source.

La implementación de huertos inteligentes tiene beneficios como la facilidad de monitorear las condiciones y crecimiento de la cosecha además de facilitar el mantenimiento regular y continuo asimismo de incrementar la productividad como se reporta en (Dwi Putro S. Setyohadi et al., 2020)

1.4 Alcance

El proyecto busca gestionar tareas de riego y cultivo de semillas de un tipo de vegetal como mínimo de manera que se caracteriza el proceso de construcción de la estructura en perfiles de aluminio V-slot, en este proyecto se utilizaran controladores Open Source como Raspberry pi, Arduino y Ramps ya que el empleo de controladores privados como tal es el caso del Ender3 y controladores Anet eleva el costo y limitan la obtención de información del componente. Dentro de este orden de ideas es necesario programar en lenguaje C y/o Python e igualmente realizar la adecuación de sensores, controladores y la selección e implementación de los componentes constituyentes del proyecto están limitados por características como ausencia de normativa IP67–68 debido a que será implementado dentro de un hogar.

1.5 Objetivos

Objetivo General

Desarrollar e implementar una máquina cartesiana (CNC) para la gestión automática de tareas de cultivo y riego de uno o más tipos de plantas que podría ser zanahoria, tomate, perejil, pimentón o cilantro y que serán cultivadas en un área de 5400 cm² en un huerto en casa (patio) utilizando luz artificial LED y basado en Farmbot mediante la implementación de tecnología Open Source.

Objetivos Específicos

1. Construir la estructura del prototipo basado principalmente en Farmbot, máquinas CNC e impresoras 3D.
2. Reutilizar el código fuente Marlin o Sprinter para efectos de calibración y funcionamiento de motores del prototipo.
3. Comprobar que el prototipo demuestre un error de desplazamiento menor o igual a 2.3 cm.
4. Validar numéricamente los resultados obtenidos del funcionamiento del prototipo de la máquina CNC.
5. Sembrar uno o más tipos de vegetales como zanahoria, cilantro, tomate, perejil o pimentón de forma automática y regarlas en función al tipo de planta y condiciones climáticas de manera autónoma.
6. Determinar la frecuencia de riego en función al tipo de semilla (planta) y condiciones climáticas.

2. Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Requerimientos generales

Es importante tener en cuenta los aspectos de diseño del prototipo y el entorno en el que estará expuesto, ya que estos factores pueden limitar el uso por ejemplo de materiales, como algunos metales que se oxidan cuando entran en contacto con el agua. Por lo tanto, es fundamental

seleccionar materiales adecuados que sean resistentes frente a condiciones del entorno, así como también elegir sistemas de control y dimensiones apropiadas para lograr un diseño eficiente y funcional del prototipo, los factores relevantes están expuestos en la tabla 1.

Tabla 1: *Requerimientos generales del prototipo*

Factores	Determinantes
Función	La función de la máquina CNC es gestionar automáticamente tareas de cultivo, riego de una o más tipos de plantas.
Dimensión	La máquina tendrá un área de cultivo de 5400 cm^2 y una altura en su eje Z de 0.5 m
Movimientos	El desplazamiento es lineal paralelo al plano. Tener una secuencia de riego, cultivo y toma de muestras.
Materiales	Se utilizará madera para la base del prototipo, mientras que los soportes se fabricarán en acero inoxidable de calibre 12. Además, se empleará aluminio para los ejes debido a su propiedad de ser un material más ligero. Las herramientas intercambiables se imprimirán en PLA.
Sistema de control	El sistema de control que utilizará el prototipo es el Arduino Mega R3 2560
Limitaciones	El prototipo no utilizará un servidor web dedicado, no será capaz de medir parámetros específicos del suelo como el nivel de nitrógeno y otros elementos, excepto por la humedad del suelo. Además, no incluirá cámaras ni motores con encoders incorporados.
Mantenimiento	Realizar una revisión periódica de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos de la máquina, como también una calibración y ajustes específicos de correas, poleas dentadas y drivers.
Tipo de cultivo	Se cultivará zanahoria.

Requerimientos para el cultivo de un vegetal o fruta.	Las condiciones ambientales deben ser adecuadas para la especie de planta que se desea cultivar (zanahoria), por lo tanto, se tiene en cuenta sus requerimientos climáticos como temperatura y humedad del lugar en el que se implementará la máquina, así como también las necesidades hídricas de la planta.
Impacto ambiental	A pesar de realizar procesos de bajo consumo energético, la máquina puede generar emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la fabricación de ciertos componentes que utilizará la máquina con materiales no sostenibles.

2.2 Sistema de control

El sistema está controlado por una placa electrónica llamada Arduino Mega R3 2560, que interactúa con los distintos componentes activos del sistema, como los motores paso a paso, la electroválvula solenoide y la bomba de vacío. Además, se integra un sensor digital de humedad de suelo y tres sensores binarios de posición o contacto.

2.3 Componentes constituyentes del prototipo

Tabla 2: Lista de materiales

Cantidad	Material	Descripción
4	Motores paso a paso	Movimientos de los ejes X, Y, Z
2	Soporte para el eje Y	Pieza en aluminio calibre 12 para sujeción del eje Y al perfil de aluminio
4	Soporte para el eje X	Pieza en aluminio calibre 12 para sujeción del eje X a la base de madera
2	Soporte para eje Y, Z	Pieza en aluminio calibre 12 para sujeción del eje Y, Z entre si
6	Perfil de aluminio estructural 2020, 2040 y 2060 V-slot	1 V-slot 2020 Longitud de 1000mm, 2 V-slot 2040 Longitud de 1000mm y 3 V-slot 2060 longitud de 500mm
1	Base de madera	Base estructural de 500mm x 1000mm x40mm
3	Portacables lineales	Elemento que lleva las mangueras de aire, agua y el cableado eléctrico. Longitud 1000mm.
32	Tornillo M3 x 25mm	Tornillería para aislamiento eléctrico y sujeción.

6	Tornillo M4 x10mm	Tornillería para los aros imanes neodimio.
175	Tornillo M5 x10mm	Tornillería general de sujeción de componentes a los perfiles de aluminio
33	Espaciadores o separadores M5x6mm	Permitirán generar un espacio libre entre 2 o más componentes.
175	M5 Tuerca en T	Tuercas de sujeción para tornillería en perfiles de aluminio.
27	Tuerca M3 tipo Hexagonal Locknut	Tuercas de sujeción para tornillería.
15	Anillo magnético neodimio aro N52	Imanes que permitirán el intercambio de herramientas y conexiones electrónicas.
12	Resortes de compresión 11mm	Permitirán la retracción de tornillos M3x30mm en la herramienta general de intercambio.
1	Tarjeta electrónica RAMPS v1.4	Tarjeta controladora CNC.
1	Arduino Mega 2560 R3	Microcontrolador.
1	Electroválvula solenoide	Dispositivo que controla el paso de líquidos o gases en un estado normalmente cerrada (NC).
1	Fuente de alimentación	Fuente de alimentación del prototipo.
1	Bomba de vacío	Dispositivo electromecánico utilizado para extraer gases.
1	Sensor de humedad	Dispositivo electrónico capacitivo que medirá la cantidad de humedad presente en la tierra.
3	Herramientas montura 3d	Inyector de semillas, herramienta para sensor de humedad y herramienta de posicionamiento de semillas.

2.3.1 Especificaciones técnicas del hardware

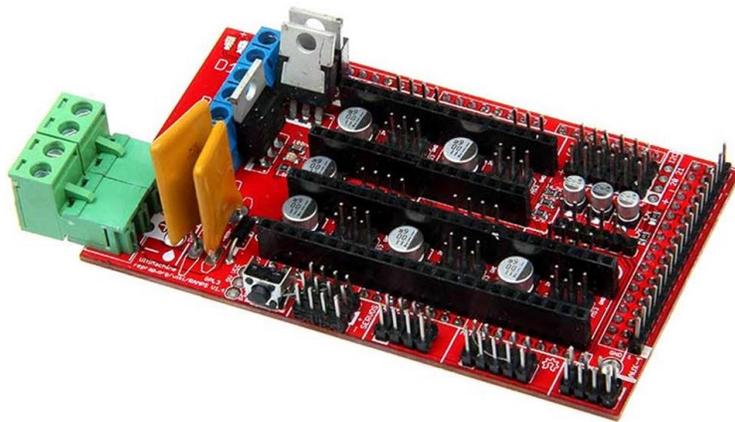
➤ **Arduino Mega 2560 R3**

Arduino Mega2560: Posee un microprocesador ATmega328, 256 KB de memoria flash que permite la lectura y escritura así mismo el almacenamiento de grandes cantidades de datos en un espacio reducido. También incluye una memoria SRAM de 8KB, contiene 54 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 16 pines de entrada son análogos y 15 ofrecen salida PWM. Además, tiene una memoria EEPROM de 4 KB y funciona con un voltaje de 5V.

➤ **Ramps V1.4**

Tarjeta Ramps V 1.4: Es una shield que permite conectar 6 motores nema distribuidos así: Dos motores para extrusores, un motor en el eje X, un motor en el eje Y y dos motores para el eje Z. Dispone de una conexión de termistor para cada extrusor, conexión de cama caliente y conexión de hasta cinco controladores para motores paso a paso o también llamados “pololu’s”, y que son necesarios para el control de pasos para cada motor. En el caso de los dos motores del eje Z, se puede utilizar un solo controlador. La tarjeta se alimenta con 12V y cuenta con pines de encendido, ajuste de resistencia para drivers y ajuste de pasos por motor.

Figura 4: *Tarjeta Ramps V1.4*



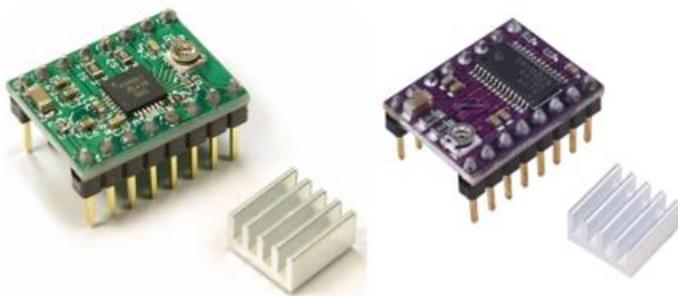
➤ **Motor paso a paso NEMA 17**

El motor paso a paso es un componente electromecánico que transforma el impulso eléctrico en un desplazamiento angular o también llamado “paso”. Tienen grandes aplicaciones en la industria de robots, drones, así como en la industria de impresoras 3D. Las principales características pueden ser resumidas en cuanto a su funcionamiento la posición puede ser cuantificada en ángulo por paso además de conocer su posición sin necesidad de anexar o incluir un componente de realimentación, otra característica es que este motor no posee escobillas, por lo cual se evita el desgaste del esmalte en motores que incorporan escobillas. El modelo del motor es 42HB34F08AB, su voltaje de operación es de 12V, su corriente de operación es de 0.4A, su ángulo por paso es de 1.8° y con un torque máximo de 38 Nm

Figura 5: *Motor paso a paso Nema 17*

➤ **Controlador A4988 y DRV8825**

Controladores A4988 o -DRV8825: Estos dispositivos facilitan el control de motores paso a paso. Además, pueden calentarse durante su funcionamiento, por lo que es necesario utilizar un disipador de calor o ventilador para evitar daños. Son ampliamente utilizados en la industria de impresoras 3D y CNC, y su uso permite la automatización del control mediante dispositivos como Arduino.

Figura 6: *Controladores A4988 y DRV8825*

A continuación, se nombran algunas especificaciones de los dos controladores.

Tabla 3: *Características de controladores A4988 y DRV8825*

Modelo	A4988	DRV8825
Color característico	Verde o rojo	Morado
Intensidad máxima	2A	2.5A
Tensión máxima	35V	45V
Micro pasos	16	32
Resistencia R_S típica	50 m Ω , 0.1 Ω y 0.2 Ω	0.1 Ω

➤ **Electroválvula solenoide**

La electroválvula solenoide funciona con un voltaje de operación de 12V y una potencia nominal de 5W. La función de este dispositivo es controlar el paso de fluidos y/o gases y se encuentra en estado normalmente cerrado (N/C). Puede soportar una presión máxima de 0.8 MPa y fluidos con temperatura de hasta 100°C.

Figura 7: *Electroválvula Solenoide*



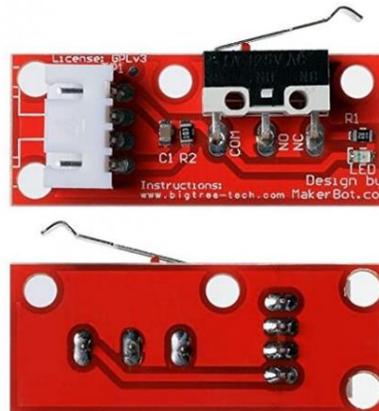
➤ **Bomba de vacío**

La bomba de vacío seleccionada es del fabricante Airpo y su modelo es D2028. Este dispositivo accionado principalmente electrónicamente o electromecánicamente, está diseñado para extraer gases o líquidos. Además, su voltaje de operación es de 12V y su corriente de operación de 1A.

Figura 8: *Bomba de vacío*

➤ **Finales de carrera**

El final de carrera también llamado interruptor de posición o switch de límite, es un dispositivo que se utiliza para detectar la posición de un objeto en un punto específico. Estos interruptores pueden ser activados mecánicamente, eléctricamente y ópticamente. Se utilizan en maquinaria industrial y robótica para establecer límites de movimiento y prevenir daños o accidentes.

Figura 9: *Interruptor - Final de carrera EndStop*

➤ **Sensor de humedad**

El sensor de humedad es un dispositivo que permite medir la cantidad de humedad en el aire y/o en tierra, está diseñado con materiales resistentes que permiten su uso constante en suelos

sin deteriorarse. Además, es importante colocar el sensor a una distancia óptima para obtener una lectura precisa. Se puede observar los niveles de profundidad óptimos en la figura 10:

Figura 10: *Sensor de humedad capacitivo Gikfun Ek1940*

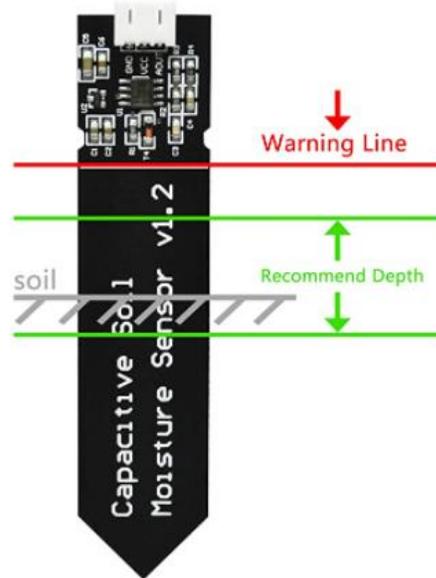


Tabla 4: *Características de sensor de humedad Ek1940*

Modelo de sensor	Gikfun EK1940
Versión de sensor	1.2
Tipo de sensor	Capacitivo
Voltaje de operación	Desde 3.3V hasta 5.5V
Voltaje de Salida	Desde 0V hasta 3V
Tipo de señal de salida	Analógica

➤ **Herramienta intercambiable de monturas (HIM)**

La HIM o herramienta intercambiable de monturas es la encargada de acoplar las diferentes herramientas diseñadas para el prototipo. Aunque estas herramientas de acople se abordaran más adelante en el documento, algunas de ellas son: acople de herramienta de agua, acople de inyección de semillas y acople de herramienta de censado de humedad de la tierra. La herramienta de acople de inyección de semillas es esencial para establecer una etapa de cultivo o dividir un cultivo en dos o más etapas de siembra, según los diferentes tipos de semilla que se quieran incorporar en el

futuro. La herramienta de acople de agua está diseñada para proporcionar un riego constante de acuerdo a las necesidades hídricas de la planta. La herramienta de acople de censado de humedad de tierra está diseñada para medir la humedad del suelo con el fin de establecer las necesidades hídricas que necesita la planta.

En la tabla 5 se pueden visualizar las conexiones electrónicas que estarán equipadas en la herramienta intercambiable de montura (HIM).

Tabla 5: *Conexiones electrónicas para herramienta universal de montura*

Conexiones HM	Conexión	Uso
A	+5V	Sensor de humedad.
B	Tierra	Conexión a tierra de las herramientas.
C	Entrada digital pin: D63	Verificación de herramientas.
D	Entrada analógica pin: D59	Señal de sensor de suelo.
E		Herramienta rotativa.
F-G	Posibles expansiones	Posibles nuevas funciones desarrolladas a futuro.
H		Herramienta rotativa.
I-J-K	Posibles expansiones	Posibles nuevas funciones desarrolladas a futuro.
L	Tierra	Conexión auxiliar de tierra de las herramientas.

➤ Fuente de alimentación

Fuente de poder de 12V: Es un dispositivo que convierte la corriente alterna en corriente directa y suministra voltaje y corriente constantemente. Esta fuente de alimentación cuenta con protección contra sobrecargas y cortocircuitos, y utiliza un regulador de voltaje para garantizar que el voltaje de salida siempre sea constante.

2.4 Software y firmware

Lenguajes de programación:

- Lenguaje C++
- Gcode

C++ es un lenguaje de programación de alto nivel utilizado principalmente para crear programas de software. Es ampliamente utilizado en sistemas embebidos, videojuegos, sistemas operativos, entre otros. Arduino utiliza C++ como lenguaje de programación debido a su capacidad de estructurar programas y datos. También permite un control más cercano del hardware en comparación a otros lenguajes de programación de alto nivel.

Gcode es un lenguaje de programación utilizado en control numérico (CN) para proporcionar instrucciones a la máquina CNC (independientemente del tipo de CNC como impresoras 3D, fresadoras, etc.). Los códigos G indican “qué” y “cómo” se debe hacer una instrucción específica en la máquina CNC. Cada instrucción está compuesta por una letra y varios números enteros o racionales. Algunos de los códigos que se utilizarán en este proyecto se describen en la tabla 6.

Tabla 6: *Códigos G de desplazamiento*

Gcode	Tipo de instrucción	Ejemplo	Explicación
G0 – G1	Movimiento en línea recta	G1 X10.0 Y23.0 Z13.0 F2300	Moverse en línea recta desde posición actual a la coordenada (10,23,13) a una velocidad de 2300 [mm/min]
G28	Volver a punto de origen o “home point”	G28	Se detiene durante 200 milisegundos y todos sus ejes (X, Y, Z) vuelven al punto (0,0,0)
G90	Fija posición absoluta	G90	Fija una coordenada como punto de origen o “home point”

La tabla 7 muestra los códigos G que se emplearán para obtener la información de los parámetros de posición actuales y el estado de los finales de carrera.

Tabla 7: *Códigos G para parámetros de posición Endstop*

Gcode	Tipo de instrucción	Ejemplo	Explicación
M114	Obtener posición actual de la máquina CNC	M114	La máquina CNC entregará la coordenada actual de posición
M119	Obtener estados de los finales de carrera	M119	La máquina CNC entregará los estados actuales (número binario 1,0) de los finales de carrera

2.4.1 Marlin y Sprinter

El firmware Marlin es un programa creado por la comunidad de RepRap y Ultimaker en 2011. Actualmente, se utiliza en diversos sistemas CNC, fresadoras, impresoras 3D y máquinas cartesianas. Este firmware de código abierto funciona como generador de enlace entre hardware y software, es decir; que previamente se debe haber cargado otro firmware para que el programa Marlin pueda generar dicho enlace. El lenguaje de programación usado por este firmware es C++ y el lenguaje de instrucciones son en código G.

2.4.2 Arduino y Ramps V1.4

La tarjeta Ramps V1.4 se acopla al microcontrolador Arduino Mega R3 quien es el encargado de controlar todos los estados de los motores paso a paso, finales de carrera, interruptores, bomba de vacío, electroválvula solenoide, drivers A4988 o DRV8825 y sensor de humedad.

2.4.3 Raspberry Pi 3

Es una computadora del tamaño de una tarjeta de crédito, tiene un procesador Córtex A53 que funciona a 1.4 GHz, incorpora un módulo interno de memoria RAM de 1GB, y posee pines

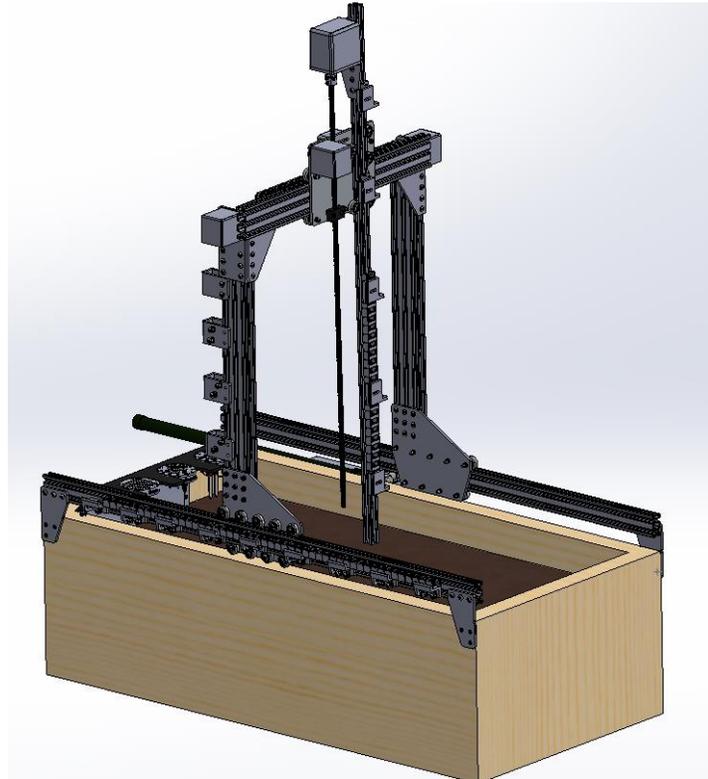
para conexiones digitales y/o analógicas. Además, incorpora un puerto ethernet, conexión Bluetooth 4.2 y Wifi Dual Band, en este caso, se utilizará la Raspberry Pi para monitorear el estado de la máquina mediante una conexión por cable al Arduino Mega R3.

3. Capítulo 3: Metodología

Primeramente, se diseñó el prototipo en el software SolidWorks con las especificaciones previamente mencionadas (requerimientos generales y estructurales), posteriormente se empezó a construir el prototipo. Luego, en los siguientes apartados se detalla el desarrollo de la estructura, los ejes, los planos de los platos de desplazamiento, las herramientas intercambiables, los soportes, su funcionamiento y la configuración electrónica. Finalmente se llevó a cabo la instalación del prototipo.

3.1 Diseño CAD

El diseño finalizado del prototipo se realizó en el software Solidworks siendo un ensamblaje con más de 1004 piezas, incluyendo platos de desplazamiento, soportes, herramientas de montura intercambiables, ejes, electrónica que se explicaran más adelante.

Figura 11: *Diseño CAD del prototipo*

3.1.1 Estructura y ejes

Se realiza el diseño de la base en madera con medidas de $110\text{ cm} * 50\text{ cm}$ y con una altura de 29 cm con un área de:

$$A = 110\text{ cm} * 50\text{ cm}, \quad A = 5500\text{ cm}^2$$

Ejes

Para el análisis estructural de cada eje se toma el factor de seguridad para el material de aluminio de $1.5 - 2$ de acuerdo con los valores mínimos recomendados estipulados en (Vicente & Useche, 2018).

$$f_s = 1.5$$

En el eje de desplazamiento X se utiliza perfil de aluminio 2040 de 1100 mm de largo.

Figura 12: *Perfil de aluminio estructural V-slot 2040*



Se utiliza un perfil estructural de aluminio 2060 de 500 *mm* para el eje de desplazamiento Y, ya que en esta dirección se acoplarán elementos como herramientas, mangueras y algunos componentes electrónicos.

Figura 13: *Perfil de aluminio estructural V-slot 2060*



En el eje de desplazamiento Z se utiliza perfil estructural de aluminio 2020 de 1000 *mm*, ya que se requiere que este eje sea lo más ligero posible. La longitud de este eje se determinó en base a los resultados obtenidos en Farmbot. La altura es un factor determinante, ya que cuanto más largo sea este eje, mayor será el área perpendicular al eje X que permitirá en un futuro cultivar plantas con características especiales, como plantas de tipo arbustos, tallos extralargos y hojas extragrandes.

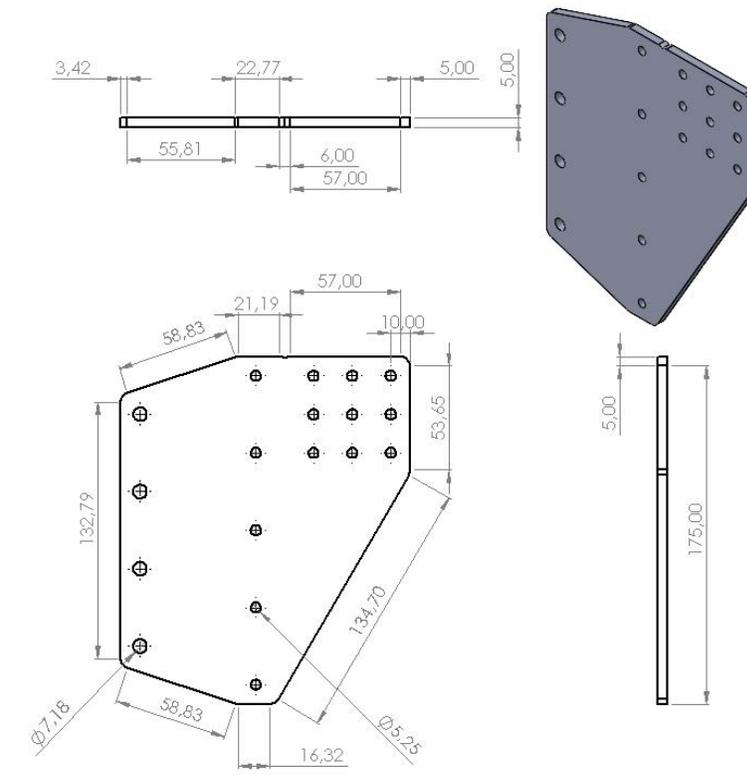
Figura 14: *Perfil de aluminio estructural V-slot 2020*



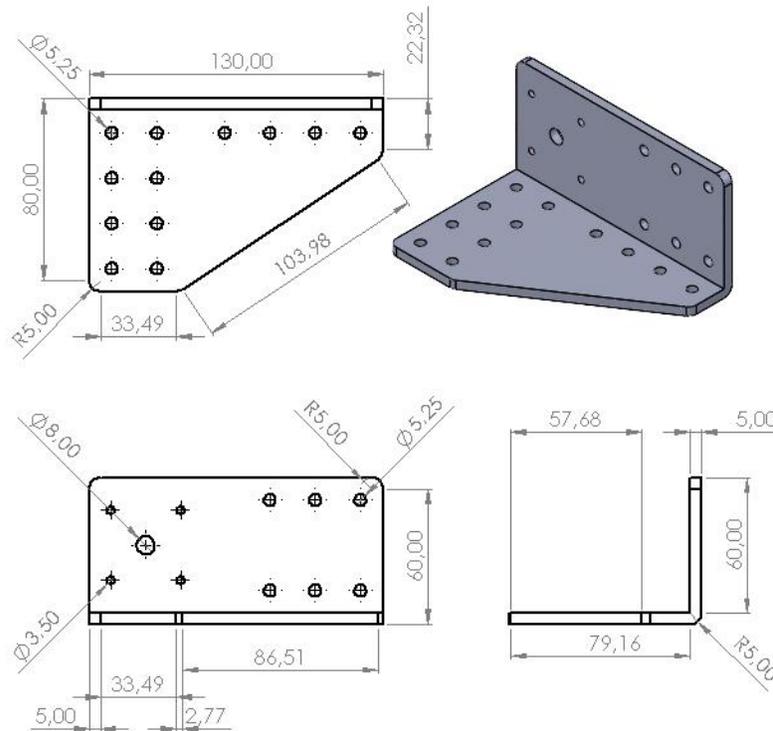
3.1.2 Platos de desplazamiento

Los platos de desplazamiento son los encargados de soportar toda la carga de la máquina y permitir el cambio de una posición inicial a una posición final en un respectivo eje, este desplazamiento se genera mediante el movimiento lineal sobre un perfil estructural de aluminio por medio del uso de rodamientos 625zz.

El plato de desplazamiento de eje X (figura 15) se ensambla hacia el perfil de aluminio 2040 V-slot mediante el acople de 9 rodamientos 625zz, y también se ensambla el perfil 2060 V-slot por medio de tornillería M5 permitiendo generar la estructura del eje Y del prototipo. La unidad de longitud utilizada desde la figura 15 hasta la figura 25, son en milímetros [mm].

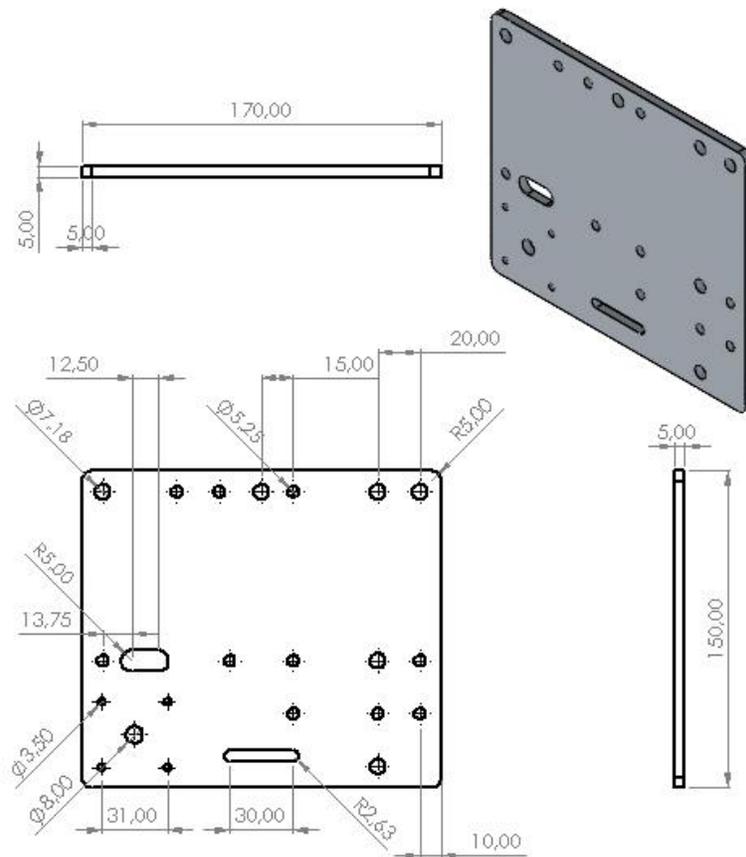
Figura 15: *Plato de desplazamiento eje X*

El plato de sujeción entre eje Y y eje X son los encargados de unir la estructura entre dos motores paso a paso en el eje X y el perfil de aluminio 2060 V-slot y que se ocupan en generar el desplazamiento en el eje X mediante el acople de poleas y correas dentadas.

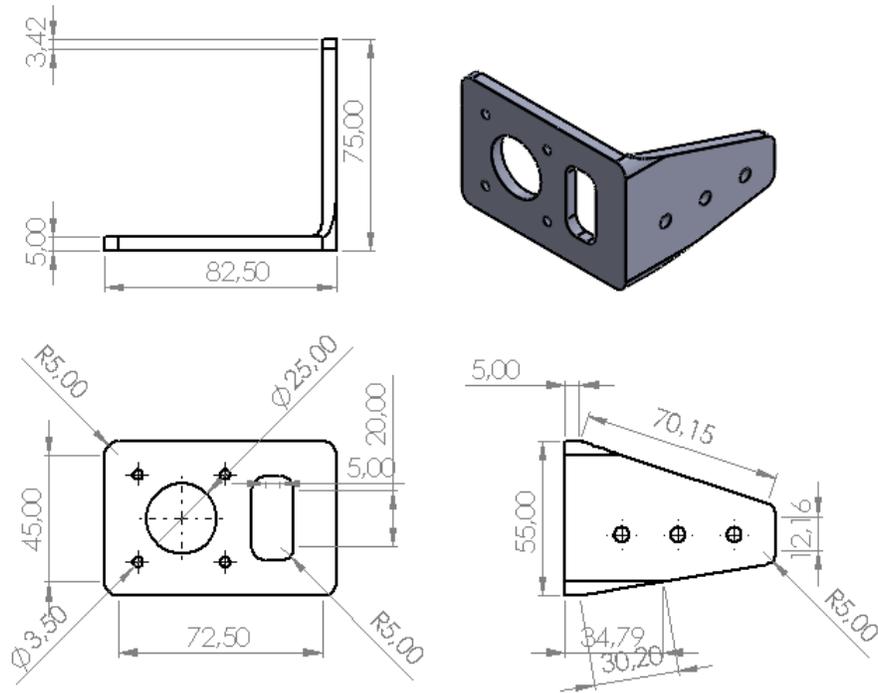
Figura 16: *Plato de sujeción entre eje Y y eje X*

La tarea principal del plato de desplazamiento y sujeción entre eje Z y eje Y es permitir el desplazamiento en el eje Y gracias al ensamble de un motor paso a paso y acople de poleas y correas dentadas, adicionalmente tiene ensamblado 7 rodamientos para el eje Y y 5 rodamientos para el eje Z, esto con el fin de poder generar su desplazamiento.

Figura 17: *Plato de desplazamiento y sujeción entre eje Z y eje Y*



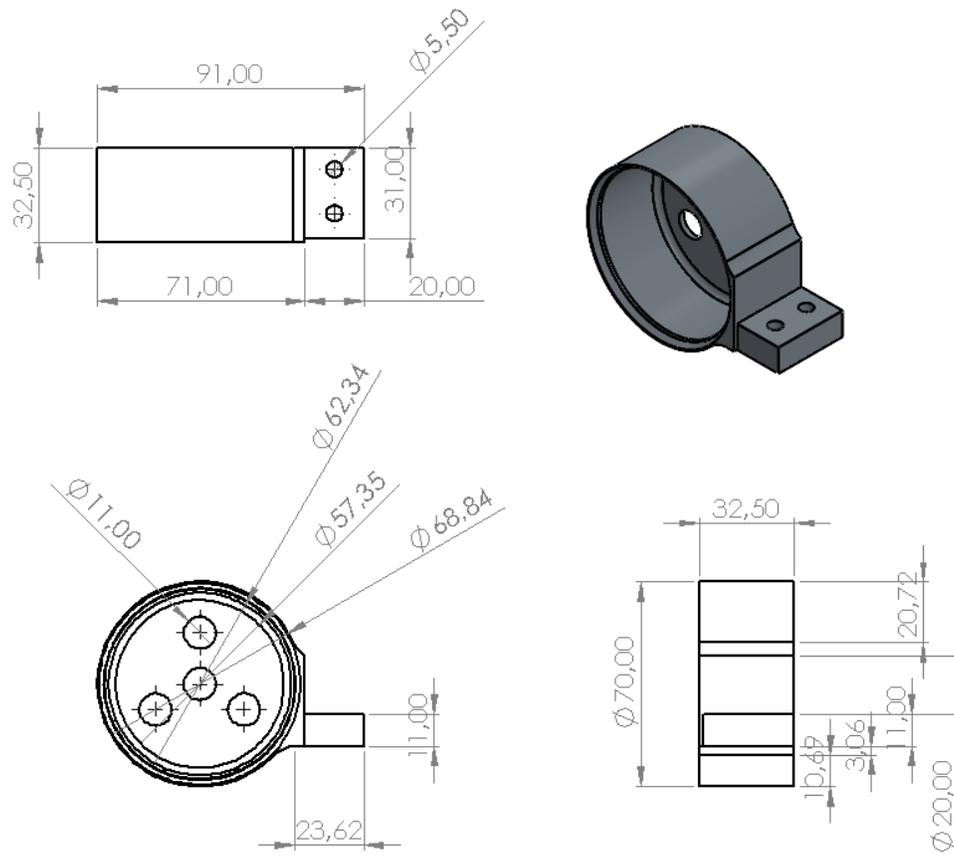
El soporte de sujeción eje Z fue diseñado con el fin de ensamblar el motor paso a paso hacia el eje Z, para originar el desplazamiento en este eje gracias a un acople de 8 mm conectado entre el motor paso a paso y una varilla roscada de 8mm.

Figura 18: *Soporte de sujeción eje Z*

3.1.3 Herramientas intercambiables (HIM) y soportes

Las herramientas intercambiables (HIM) y soportes, permiten realizar el intercambio entre las diferentes herramientas de montura universales (HIM), se pueden acoplar y desacoplar en cualquier momento gracias al ensamble de imanes de neodimio en forma de aro que, además de permitir el acople y desacople sirven como medios de conexión de corriente y test de herramientas HIM.

Figura 19: *Herramienta de montura universal (HIM) parte superior*



La herramienta de montura universal (HIM) consta de dos partes (figura 19 y figura 20), estas herramientas van ensambladas en el eje Z. Vienen acopladas tres mangueras, en una de ellas viene incorporado el cable UTP utilizado para realizar las conexiones electrónicas, las dos mangueras restantes son: manguera de succión de aire y la manguera donde fluye el agua.

Figura 20: *Herramienta de montura universal (HIM) parte inferior*

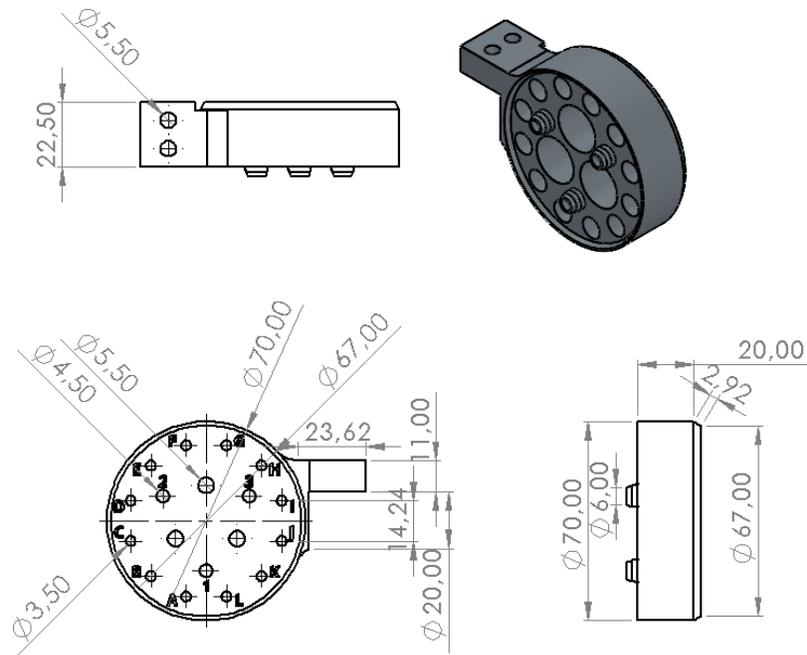
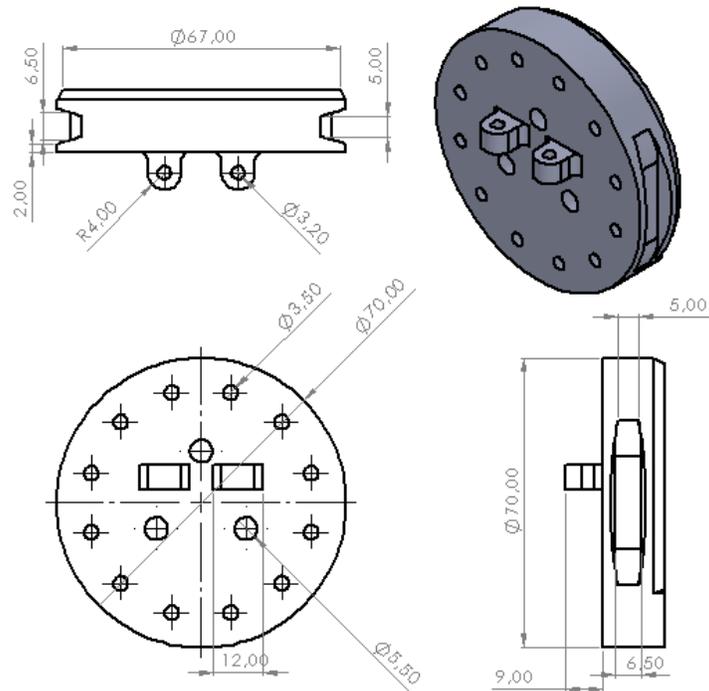
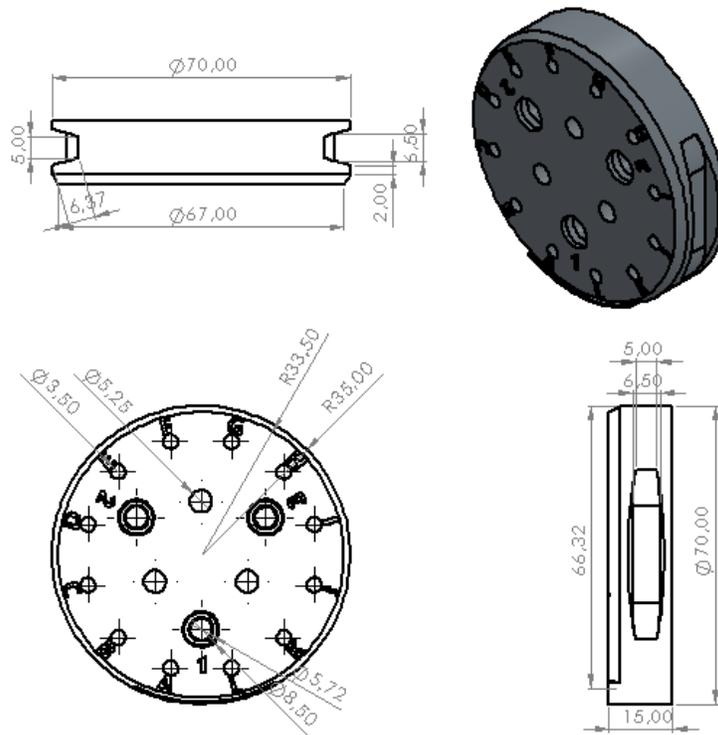


Figura 21: *Herramienta de montura de censado*



La herramienta de montura de censado se encarga de tomar las muestras de humedad del suelo (tierra) mediante la instalación de un sensor de humedad capacitivo.

Figura 22: *Herramienta de montura de agua parte superior*



La herramienta de montura de agua está dividida en dos partes (figura 22 y figura 23), se ensamblan manualmente y esta herramienta de acople es la encargada de redistribuir uniformemente el agua en un diámetro de 94 mm.

Figura 23: *Herramienta de montura de agua parte inferior*

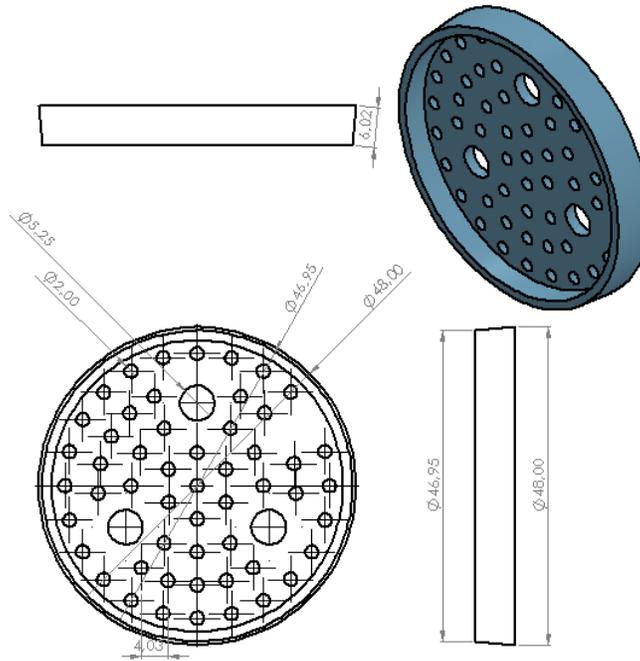
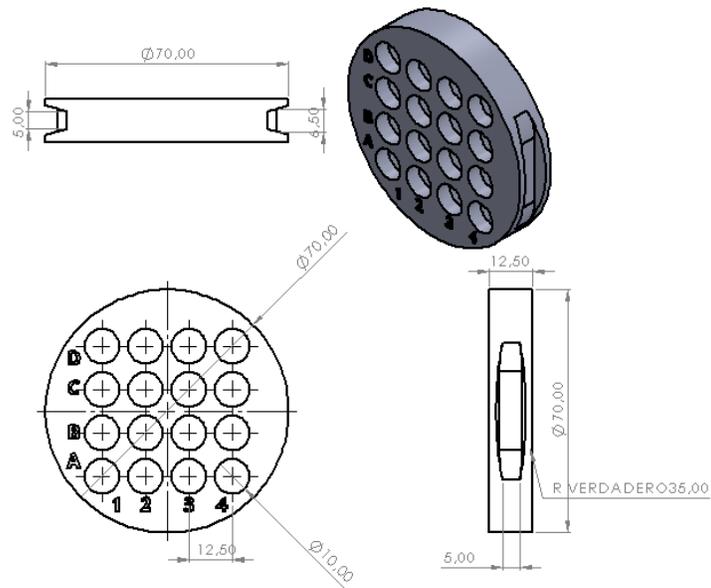
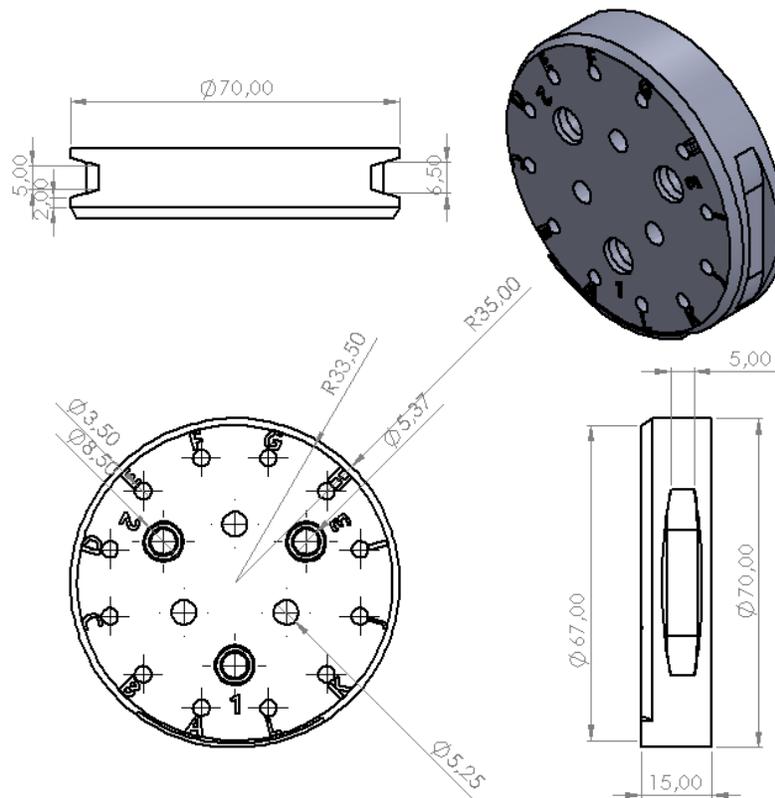


Figura 24: *Herramienta matricial semillero*



La herramienta matricial semillero es la única herramienta que no fue diseñado con el fin de acoplar y desacoplar. La función de esta herramienta es permitir la siembra de hasta 16 tipos de semillas. Esta herramienta cuenta con un diseño matricial 4 por 4, donde las filas y columnas están nombradas y enumeradas. Esto permite identificar la posición de cada semilla ubicada en cualquiera de los 16 orificios de la matriz, lo que facilita la siembra de diferentes tipos de semillas.

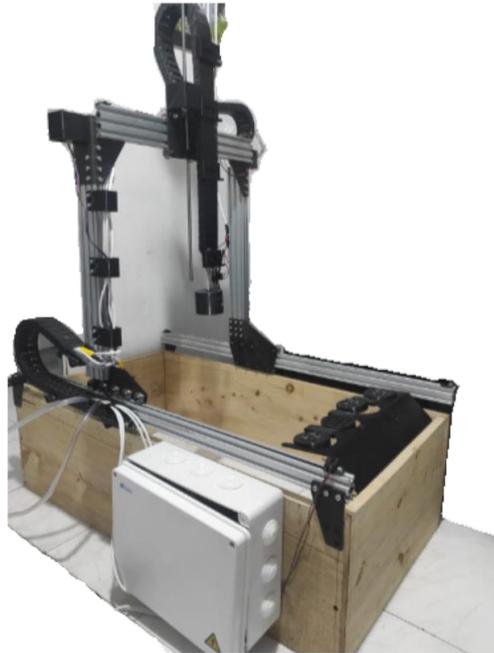
Figura 25: *Herramienta de montura de inyección de semillas*



La herramienta de montura de inyección de semillas fue diseñada con el propósito de succionar las semillas colocadas en la herramienta matricial de semillas y posteriormente inyectarlas en la tierra mediante una jeringa ensamblada.

3.2 Ensamble general

El ensamble, instalación y su puesta en funcionamiento del prototipo se realizó en una casa ubicada en Soacha se puede apreciar en la Figura 26 el ensamble general del prototipo.

Figura 26: *Prototipo instalado en casa*

3.2.1 Reutilización código fuente Marlin/Sprinter para efectos de calibración

El código fuente Marlin es un firmware de código abierto diseñado con el fin de ser utilizado en impresoras 3D y máquinas de control numérico, en este prototipo se ejecutó en la placa de control Arduino Mega R3 2560 para obtener los parámetros de configuración de los motores, incluyendo el paso por ángulo y la velocidad, para efectuar una posterior calibración. Durante el proceso, se utilizaron los códigos G listados en las tablas 6 y 7.

3.2.2 Configuración de movimiento y velocidad de los motores

Para calcular el voltaje de referencia del driver A4988, es necesario conocer la corriente de operación máxima del motor paso a paso. Una vez se conoce este valor, se podrá calcular el voltaje de referencia.

Según la referencia del motor bipolar paso a paso la corriente máxima de operación viene especificado en la hoja de datos, y es:

$$I_{max} = 0.4 A$$

La información sobre la resistencia del potenciómetro que esta especificada en la hoja de datos del controlador A4988, es:

$$R_s = 0.1 \Omega$$

Una vez se tienen los datos de corriente máxima y resistencia del potenciómetro se procede a hallar el voltaje de referencia de la siguiente formula:

Ecuación 1: *Voltaje de referencia*

$$V_{ref} = I_{max} * (8 * R_s)$$

Reemplazando y hallando V_{ref}

$$V_{ref} = 0.4 * (8 * 0.1) = 0.32V$$

El voltaje de referencia establece el valor de voltaje de operación del motor paso a paso. Una vez establecido este valor se procede a configurar las modalidades de movimiento de motor también llamado micro pasos. La shield Ramps V1.4 permite definir la resolución de micro pasos que se utilizará para controlar la velocidad y torque del motor, se puede apreciar las diferentes configuraciones en la tabla 8.

Tabla 8: *Configuración de micro pasos para motores bipolares*

A4988	DRV8825	MODE0	MODE1	MODE2
Paso completo	Paso completo	Low	Low	Low
1/2 step	1/2 step	High	Low	Low
1/4 step	1/4 step	Low	High	Low
1/8 step	1/8 step	High	High	Low
1/16 step		High	High	High
	1/16 step	Low	Low	High
	1/32 step	High	High	High

3.3 Determinación de frecuencia de riego en función al tipo de semilla (planta) y condiciones climáticas

Para determinar la frecuencia de riego en función al tipo de semilla y condiciones climáticas, es necesario considerar factores como el tipo de cultivo, humedad y condiciones climáticas que permiten el crecimiento adecuado, por lo tanto, se debe determinar la cantidad de agua que necesita el cultivo según (Ministerio de Desarrollo Social, 2017):

Ecuación 2: Demanda hídrica

$$E_{tc} = E_{to} * K_c$$

Donde E_{tc} es la evapotranspiración de cultivo y es expresado como la demanda hídrica (mm/día)

E_{to} es la evapotranspiración de referencia ($\frac{mm}{día}$)

K_c es un factor que se ajusta a la condición de cultivo

La evapotranspiración es la cantidad de agua del suelo que se evapora y en consecuencia vuelve a la atmosfera. Ahora bien, según el estudio (Forero-Ulloa et al., 2015) E_{to} en una etapa de sembrado tiene un promedio de $2.72 \frac{mm}{día}$ y un E_{tc} promedio de $2.61 \frac{mm}{día}$.

$$2.61 \frac{mm}{día} = 2.72 \frac{mm}{día} * K_c$$

Despejando K_c se obtiene

$$K_c = 0.95$$

Ahora para relacionar la frecuencia de riego con la demanda de agua que necesita para la etapa de desarrollo de la planta según se debe aplicar riegos con una frecuencia de cada 3 o 4 días con una demanda de agua de $2.61 \frac{mm}{día}$, sin embargo el determinante de cada cuanto regar se ve sometido directamente al estado del suelo ya que debido a que la raíz de la planta se encuentre a más profundidad ocasionará un consumo menor de agua y para ello se dispone de una tabla de referencia del estado de humedad del suelo.

Tabla 9: Determinación de humedad según el estado del suelo

Grado de humedad	Estado del suelo	Contenido de humedad
Seco	Polvo seco.	Ninguna
Bajo	Se desmorona y no se aglutina.	25% o menos
Medio	Se desmorona, pero se aglutina.	25% a 50%
Aceptable	Se forma bola y se aglutina con presión.	50% a 75%
Excelente	Se forma bola, se aglutina y es amasable.	75% a 100%
Húmedo	Chorrea agua cuando se aprieta.	Sobre capacidad

Nota. Tabla tomada del documento de: (Caro Cardona, 2014)

3.4 Requerimientos de la aplicación agroindustrial

De acuerdo con el área de cultivo en Farmbot por el momento se pueden compilar un total de 33 cultivos comunes, se tiene en cuenta que no es posible incluir cultivos altos como girasoles y maíz. Además, de arbustos de bayas, asimismo no hay cultivos de granos por lo poco eficiente que es cultivar en este tipo de Hardware en comparación con equipos especializados y a mayor escala. En la siguiente tabla se especifica los días que toma cultivar algún tipo de vegetal y/o fruta hasta finalmente cosechar, igualmente se obtuvieron los valores de rendimiento por cosecha en $\frac{kg}{m^2}$

Tabla 10: Tipos de cultivos seleccionados

Cosecha	Días /cosecha	Cosecha $\frac{kg}{m^2}$
Zanahoria	70	3.36
Pepino	60	1.96
Ajo	90	0.48
Lechuga	55	3.03
Espinaca	55	1.40

Tomate	85	1.23
--------	----	------

Nota. Tomada de How much food can Farmbot grow (Rory Landon Aronson & FarmBot Team, 2015)

De acuerdo con la tabla anterior, es posible aumentar significativamente la producción al seleccionar uno o varios tipos de frutas o verduras, debido a que cada tipo de vegetal o fruta requiere un área particular para su cultivo. Por lo tanto, se puede aprovechar mejor el espacio de cultivo disponibles.

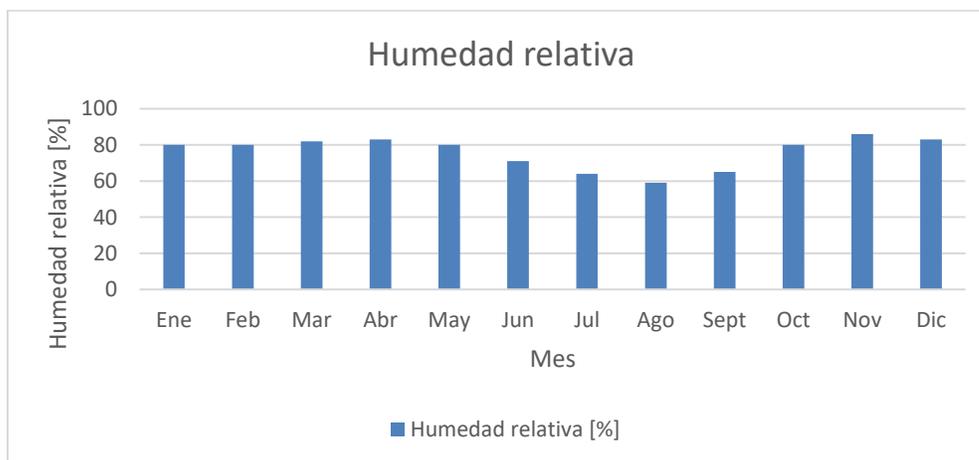
3.5 Condiciones climáticas de la zona de implementación del prototipo

El cultivo de plantas está sometidos a varios factores que determinan la calidad, germinación e incluso el tiempo específico para obtener una cosecha sana, algunos de los factores son:

- Condiciones climáticas
- Profundidad de surcos de siembra
- Área de cultivo

De acuerdo a lo anterior se tiene en cuenta la humedad del aire ya que es un factor indispensable para el cultivo adecuado de zanahorias, la humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la que tendría si estuviera al 100% es indispensable que la humedad relativa del aire (HR) debe estar entre el 70% y 80% de acuerdo al **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)** proporciona la siguiente información anual.

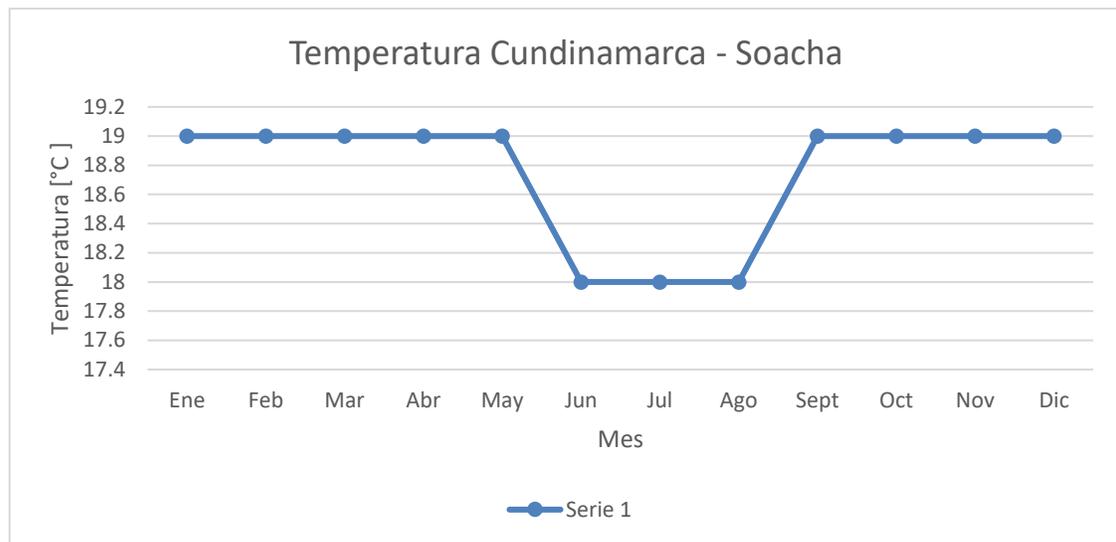
Gráfica 1: *Humedad relativa del lugar de instalación del prototipo*



Nota. Valores tomados de Previsión meteorológica mensual (Weather Atlas, 2022).

La temperatura óptima para el crecimiento de zanahorias es de 15 a 21°C (Programa de Apoyo agrícola, Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). Una ventaja del cultivo de zanahoria es que las raíces no se ven afectadas en temperaturas de hasta -5°C, lo que permite una conservación adecuada, sin embargo, en temperaturas superiores a 28°C pueden acelerar el envejecimiento de la raíz y pérdida de pigmento. (Lardizábal, 10 C.E.)

Gráfica 2: *Temperatura del lugar de instalación del prototipo*



Nota. Valores tomados de Clima y tiempo anualmente en Soacha (Weatherspark, 2022)

3.6 Instalación

Es importante mencionar que la instalación del prototipo se realizará en un lugar con acceso a una fuente de energía eléctrica estable. Además, es necesario tener un espacio adecuado con buena ventilación y libre de obstrucciones. Se instalará en la localidad de Soacha. En cuanto a la instalación de la manguera de entrada de agua, se adaptará a grifos de $\frac{1}{2}$ pulgada. Para proteger adecuadamente la electrónica del prototipo contra el polvo y la humedad, es necesario hacer uso de la caja termoplástica de membranas con certificación IP65.

4. Capítulo 4: Resultados

4.1 Validación numérica de los resultados obtenidos del funcionamiento del prototipo de la máquina

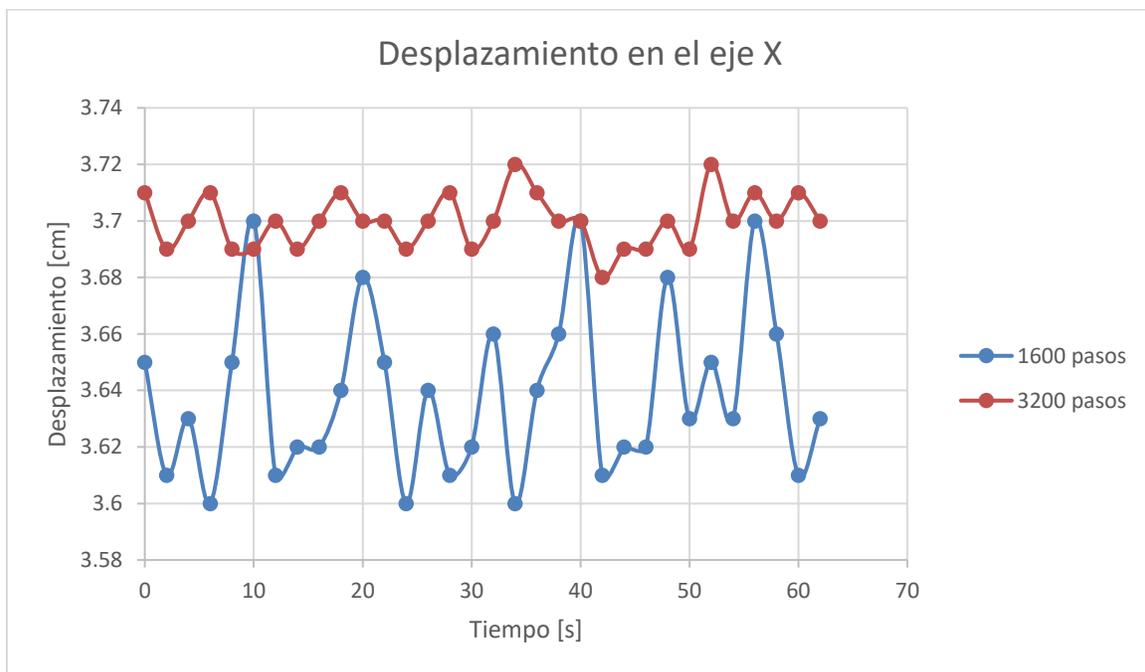
El desplazamiento en el eje X se generó usando dos motores bipolares en la configuración de micro pasos de $\frac{1}{8}$ y correspondientemente cada ángulo por paso es de 1.8° grados lo que significa que cada ángulo por paso en esta configuración es de $\frac{1}{8} * 1.8 = 0.225^\circ$, ahora bien, para que el motor de una vuelta completa se necesita la siguiente cantidad de micro pasos:

$$0.225 * x = 360^\circ, x = 1600$$

La grafica generada es de desplazamiento en el eje X usando dos motores bipolares en la configuración de pasos de $\frac{1}{16}$ y correspondientemente cada ángulo por paso es de 1.8° grados lo que significa que cada ángulo por paso en esta configuración es de $\frac{1}{16} * 1.8 = 0.1125^\circ$, ahora bien, para que el motor de una vuelta completa se necesita la siguiente cantidad de micro pasos:

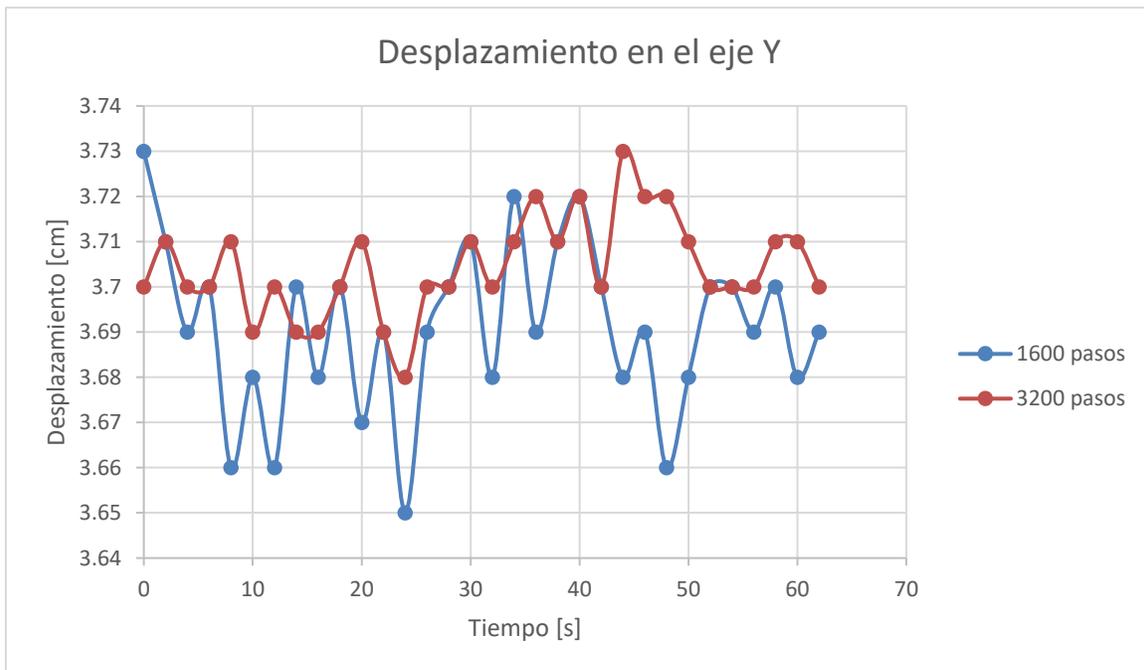
$$0.1125 * x = 360^\circ, x = 3200$$

Gráfica 3: Desplazamiento en eje X del prototipo



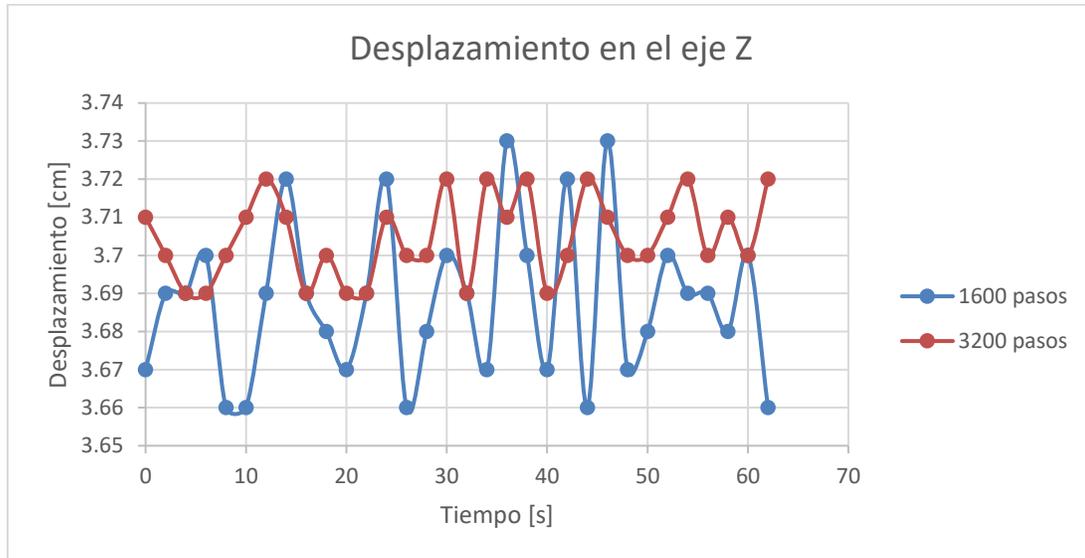
La Gráfica 4 indica el comportamiento del motor paso a paso en dos configuraciones y se puede apreciar el error de desplazamiento en cada configuración en la tabla 11. Cada rotación completa de 360° del motor se tradujo en un desplazamiento promedio del eje X de 3.64 cm en una configuración de 1600 pasos y 3.7 cm en una configuración de 3200 pasos, ésta se puede apreciar en la Gráfica 4 y Tabla 11, ahora bien, se llevaron a cabo pruebas con muestras tomadas a una velocidad constante de 1.85 cm/s .

Gráfica 4: Desplazamiento en eje Y del prototipo



Las gráficas 5 y 6 muestran como se comportan los motores paso a paso en dos configuraciones distintas a lo largo del eje Y y Z, las tomas de muestras se hacen cada 2 segundos a una velocidad constante de 1.85 cm/s . El desplazamiento promedio en el eje Y en la configuración de 1600 pasos es de 3.69 cm y en la configuración de 3200 pasos es de 3.7 cm .

Gráfica 5: Desplazamiento en eje Z del prototipo



El desplazamiento promedio en el eje Z en la configuración de 1600 pasos es de 3.68 cm y en la configuración de 3200 pasos es de 3.7 cm.

4.1.1 Comprobación de error de desplazamiento en los ejes

Para saber el error de desplazamiento en los tres ejes X, Y y Z de la máquina se necesita obtener el indicador de imprecisión (error absoluto) y el indicador de calidad de medida (error relativo)

Se obtiene el promedio de las mediciones en cada eje X, Y y Z según la toma de muestras de las gráficas 4,5 y 6:

Ecuación 3: Promedio

$$\dot{X}_{X,Y,Z} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N}$$

- Donde $\dot{X}_{X,Y,Z}$ es el promedio en el eje X, Y y Z
- X_N Son las muestras tomadas
- N Son el número total de muestras

Se calcula el error absoluto como:

Ecuación 4: Error absoluto

$$e = \frac{|X_1 - \dot{X}_{X,Y,Z}| + |X_2 - \dot{X}_{X,Y,Z}| + \dots + |X_N - \dot{X}_{X,Y,Z}|}{N}$$

➤ $\dot{X}_{X,Y,Z}$ Es el promedio en cada eje

Se calcula el error relativo como:

Ecuación 5: Error relativo

$$E = \frac{e}{\dot{X}_{X,Y,Z}}$$

Se calcula el error porcentual

$$E\% = E * 100$$

Tabla 11: Error de desplazamiento en configuración 1600 pasos

1600 pasos	Eje X	Eje Y	Eje Z
	X_X	X_Y	X_Z
Promedio $\dot{X}_{X,Y,Z}$	$\frac{116,43}{32} = 3.63 \text{ cm}$ \dot{X}_X	$\frac{118.11}{32} = 3.69 \text{ cm}$ \dot{X}_Y	$\frac{118.01}{32} = 3.68 \text{ cm}$ \dot{X}_Z
Error absoluto e	0.024 cm e_x	0.014 cm e_y	0.016 cm e_z
Error relativo	$\frac{0.024}{3.63} = 0.0066 \text{ cm}$ E_x	$\frac{0.014}{3.69} = 0.0038 \text{ cm}$ E_y	$\frac{0.016}{3.68} = 0.0043 \text{ cm}$ E_z
Error porcentual	0.66% $E\%_x$	0.38% $E\%_y$	0.43% $E\%_z$

Tabla 12: Error de desplazamiento en configuración 3200 pasos

3200 pasos	Eje X	Eje Y	Eje Z
	X_X	X_Y	X_Z

Promedio $\dot{X}_{X,Y,Z}$	$\frac{118.4}{32} = 3.7 \text{ cm}$ \dot{X}_X	$\frac{118.54}{32} = 3.7 \text{ cm}$ \dot{X}_Y	$\frac{118.55}{32} = 3.7 \text{ cm}$ \dot{X}_Z
Error absoluto e	0.0069 cm e_x	0.0086 cm e_y	0.009 cm e_z
Error relativo E	$\frac{0.0069}{3.7}$ $= 0.0019 \text{ cm}$ E_x	$\frac{0.0086}{3.7}$ $= 0.0023 \text{ cm}$ E_y	$\frac{0.009}{3.7} = 0.0024 \text{ cm}$ E_z
Error porcentual $E\%$	0.19% $E\%_x$	0.23% $E\%_x$	0.24% $E\%_x$

El error de desplazamiento y el error porcentual de desplazamiento en la configuración de 1600 pasos para los tres ejes es:

- Eje X: $0.66\% = 6.6 * 10^{-3} \text{ cm}$
- Eje Y: $0.38\% = 3.8 * 10^{-3} \text{ cm}$
- Eje Z: $0.43\% = 4.3 * 10^{-3} \text{ cm}$

El error de desplazamiento y error porcentual de desplazamiento en la configuración de 3200 pasos para los tres ejes es:

- Eje X: $0.19\% = 1.9 * 10^{-3} \text{ cm}$
- Eje Y: $0.23\% = 2.3 * 10^{-3} \text{ cm}$
- Eje Z: $0.24\% = 2.4 * 10^{-3} \text{ cm}$

Ahora bien, para cumplir el objetivo general de este trabajo de grado debe cumplirse que el error de desplazamiento sea menor a 2.3 cm , sin embargo, se puede inferir que en ambas configuraciones se tuvo índices de error muy inferiores a 2.3 cm , también cabe resaltar que la configuración a los 3200 pasos denota índices de error mucho menores en sus tres ejes por lo que es adecuado utilizar esta configuración, entonces finalmente se tiene:

Eje X

- Configuración de 1600 pasos: $6.6 * 10^{-3} \text{ cm} < 2.3 \text{ cm}$
- Configuración de 3200 pasos: $1.9 * 10^{-3} \text{ cm} < 2.3 \text{ cm}$

Eje Y

- Configuración de 1600 pasos: $3.8 * 10^{-3} \text{ cm} < 2.3 \text{ cm}$
- Configuración de 3200 pasos: $2.3 * 10^{-3} \text{ cm} < 2.3 \text{ cm}$

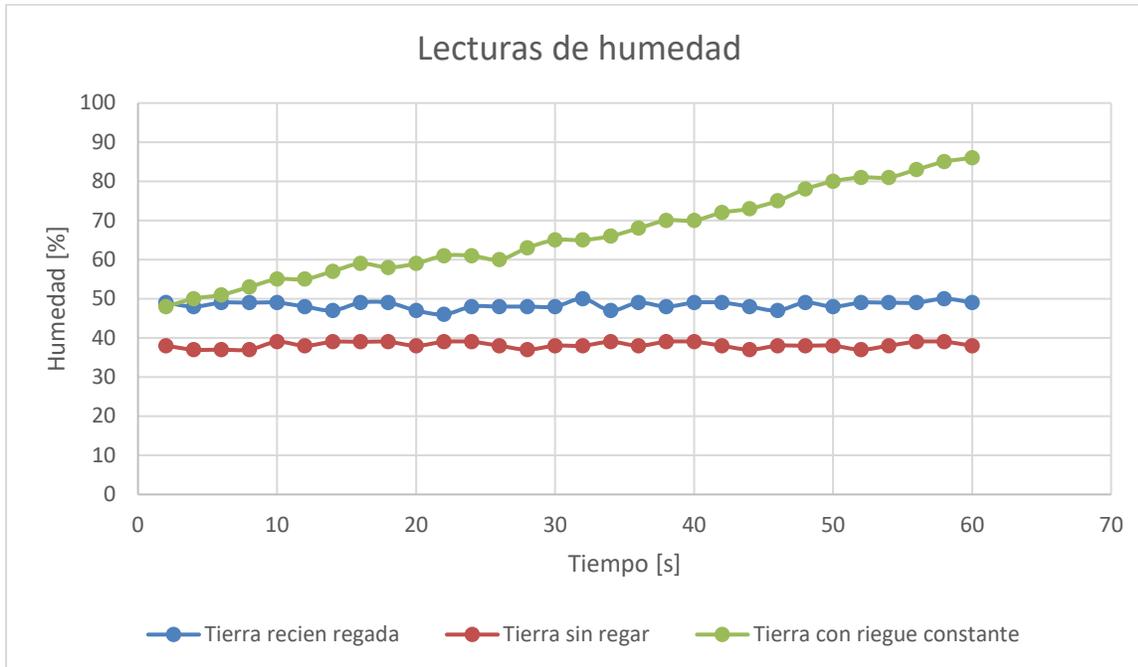
Eje Z

- Configuración de 1600 pasos: $4.3 * 10^{-3} \text{ cm} < 2.3 \text{ cm}$
- Configuración de 3200 pasos: $2.4 * 10^{-3} \text{ cm} < 2.3 \text{ cm}$

4.1.2 Censado de humedad

Se recolectaron muestras de humedad del suelo en diversas configuraciones, ya que estas representan los diferentes estados posibles que puede adoptar la tierra, y a su vez se capturaron lecturas del sensor cada dos segundos, es importante resaltar que en la configuración de “Tierra con riego constante” la medición denota un aumento muy considerable por lo que le toma alrededor de 46 segundos llegar a porcentajes de humedad apropiados para el cultivo de zanahoria, ver gráfica 7.

Gráfica 6: *Lecturas de humedad en tierra*

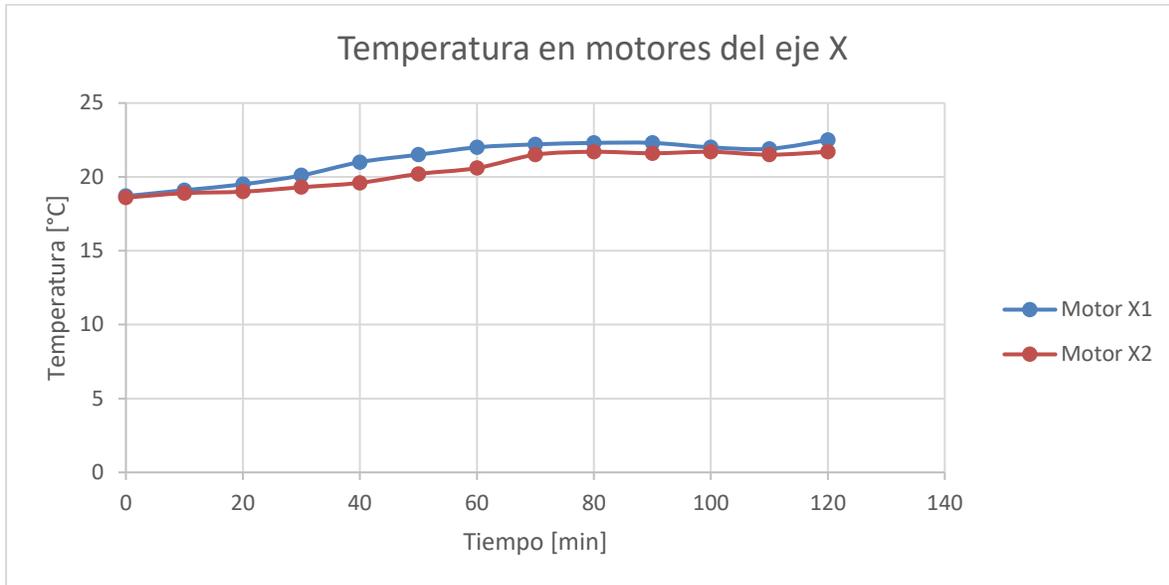


4.1.3 Censado de temperatura en motores paso a paso eje X, Y y Z

Se tomaron muestras de la temperatura de los motores en los ejes X, Y y Z cada 10 minutos durante toda la duración de la prueba, con una configuración de desplazamiento constante y una velocidad fija de 1.85 cm/s , cabe resaltar que los motores estuvieron siempre en funcionamiento continuo durante este periodo.

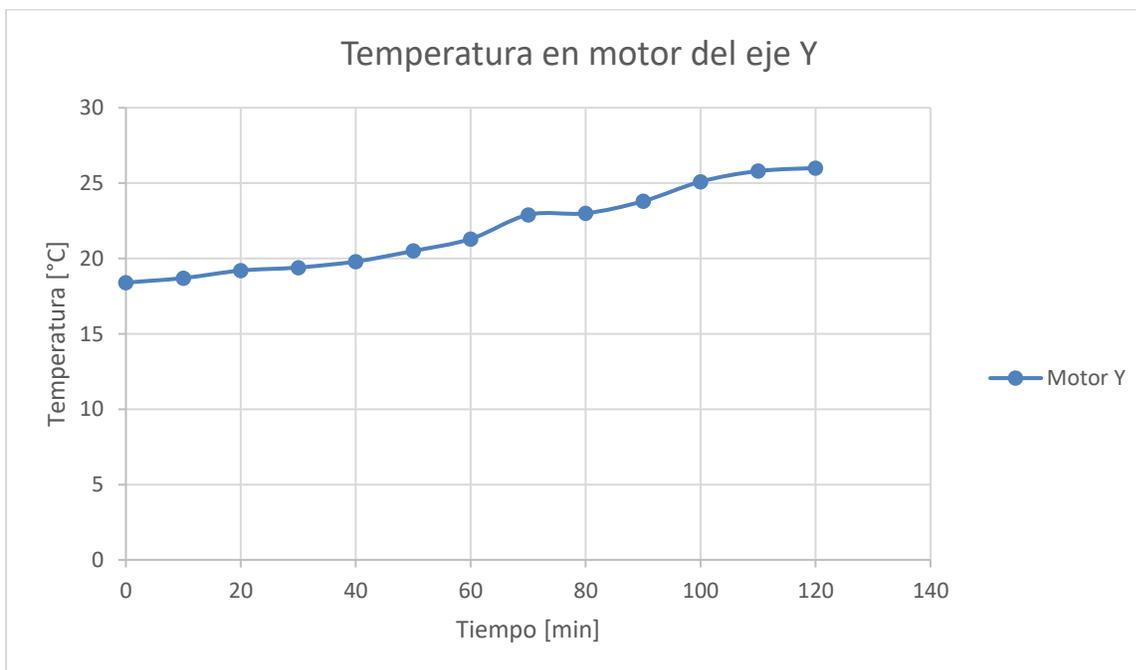
En el eje de desplazamiento X, se encuentran instalados dos motores con una configuración de 3200 pasos y una corriente de operación de 0.4A

Gráfica 7: Temperatura en los motores del eje X

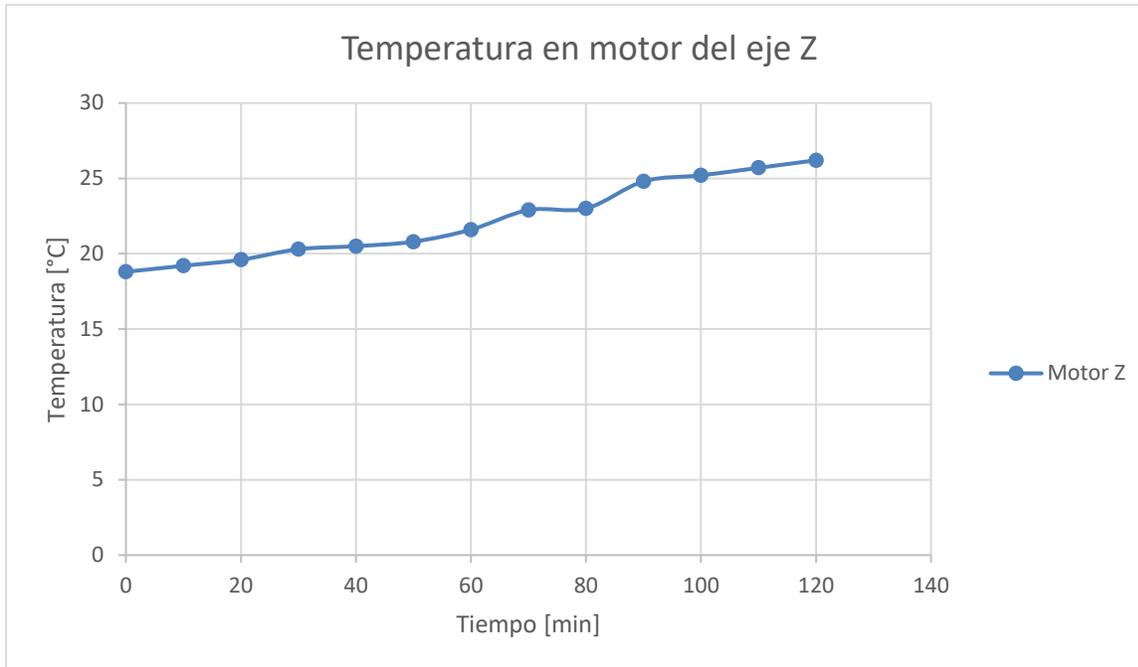


Los ejes de desplazamiento Y y Z poseen un motor por eje y se realizó la prueba con una configuración a 3200 pasos, con un paso de corriente de: 0.4A.

Gráfica 8: *Temperatura en motor del eje Y*



Gráfica 9: *Temperatura en motor del eje Z*



Los motores de los ejes X, Y y Z estuvieron sometidos durante 2 horas a estrés continuo (corriente máxima) y denoto un aumento de temperatura que no es considerable para determinar un posible daño por sobrecalentamiento a causa del uso continuo de estos mismos motores debido a factores como fuerzas y fricción.

Se debe tener en cuenta que en comparación la corriente utilizada en un motor del prototipo fue de $0.4A$ y la corriente utilizada en un motor de Farmbot fue de $1.68A$ por consiguiente, el consumo de estos motores en comparación a los motores utilizados en Farmbot fue menor ya que solo un motor de Farmbot fue de $20.16W$ en comparación a $4.8W$ consumido por uno de los motores del prototipo, presentando una reducción de $15,36W$ por motor.

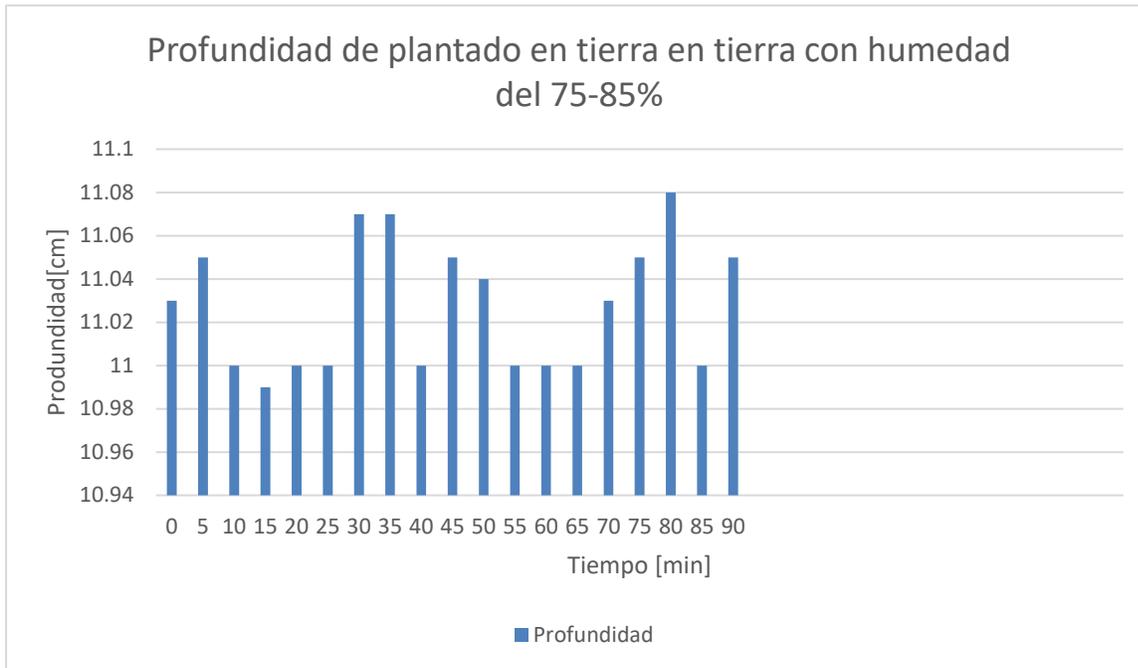
4.1.4 Profundidad de plantado en tierra con características diferentes

Se realizaron dos pruebas con configuraciones de tierra con porcentajes de humedad distintos, esto debido a que puede variar la profundidad de plantado de las semillas, de acuerdo al estado que se encuentra la tierra.

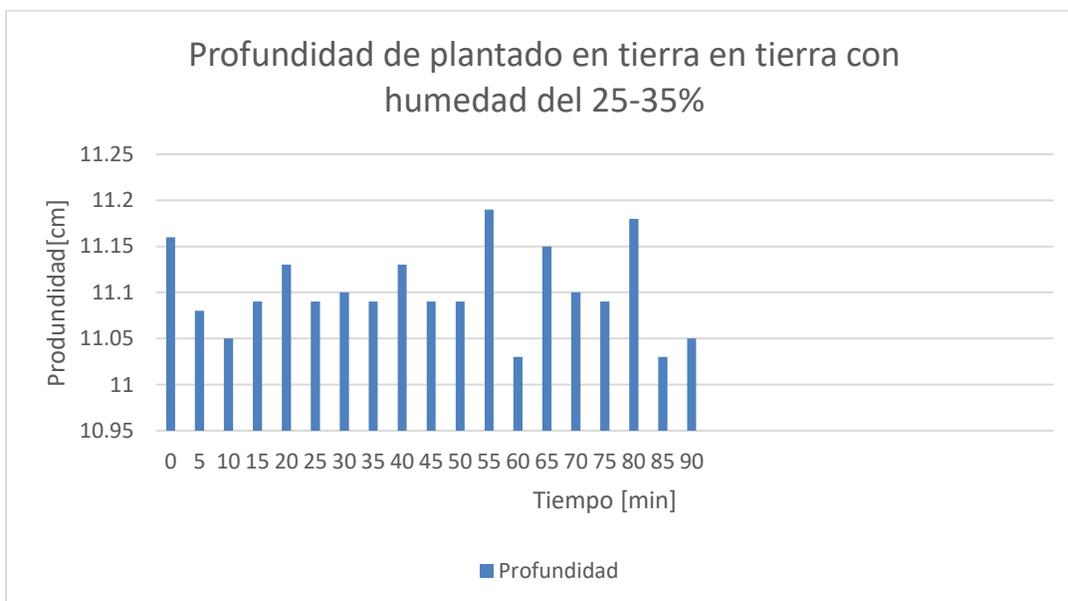
Para realizar la medición de profundidad de plantación, se compactó previamente la tierra y se modificó la herramienta de acoplamiento de inyección de semillas, mediante la incorporación de una aguja diseñada especialmente para inyectar animales bovinos debido a su grosor. Luego se simuló el proceso de inyección de semillas, lo que posteriormente permitió dejar evidencia en la

tierra compactada. Esta marca, generada por el surco producido, se utilizó para determinar la profundidad de plantación. Cabe destacar que se tomó una muestra cada 5 minutos.

Gráfica 10: Profundidad de plantado en tierra con humedad de 75-85%



Gráfica 11: Profundidad de plantado en tierra con humedad de 25-35%



Se tienen las siguientes configuraciones posibles:

- A. Profundidad de plantado en tierra con humedad entre el 25% hasta el 35%
- B. Profundidad de plantado en tierra con humedad entre el 75% hasta el 85%

Para determinar el error de profundidad de plantación en las configuraciones A y B, se necesita obtener el promedio, el indicador de imprecisión y el indicador de calidad medida. Estos datos se generaron mediante el uso de las ecuaciones 3,4 y 5, respectivamente. Los datos están representados en las tablas 13 y 14.

Tabla 13: Error de profundidad de plantado en tierra con humedad de 75%-85%

Tierra con humedad del 75-85%	Eje Z Z
Promedio \dot{X}	$\dot{X}_z = \frac{209.51}{19} = 11.03 \text{ cm}$
Error absoluto e	$e_z = \frac{0.506}{19} = 0.027 \text{ cm}$
Error relativo E	$E_z = \frac{0.027}{11.03} = 0.0024 \text{ cm}$
Error porcentual $E\%$	$E\%_z = 0.24\%$

Tabla 14: Error de profundidad de plantado en tierra con humedad de 25%-35%

Tierra con humedad del 25-35%	Eje Z Z
Promedio \dot{X}	$\dot{X}_z = \frac{210.92}{19} = 11.10 \text{ cm}$
Error absoluto e	$e_z = \frac{0.067}{19} = 0.0035 \text{ cm}$
Error relativo E	$E_z = \frac{0.0035}{11.10} = 0.0031 \text{ cm}$
Error porcentual $E\%$	$E\%_z = 0.31\%$

El error de profundidad de plantado y el error porcentual de profundidad de plantado en la configuración A, es:

- Error absoluto de: 0.027 *cm*
- Error relativo de: 0.0024 *cm*
- Error porcentual de: 0.24%

El error de profundidad de plantado y el error porcentual de profundidad de plantado en la configuración B, es:

- Error absoluto de: 0.035 *cm*
- Error relativo de: 0.0031 *cm*
- Error porcentual de: 0.31%

Comparando los resultados de la gráfica 10 y 11 con los datos obtenidos en las tablas 13 y 14, se puede observar un error no muy significativo.

En tierra con porcentajes de humedad del 75% al 85%, el error de profundidad de plantado fue de $2.4 * 10^{-3}$ *cm*, lo que equivale a un error porcentual del 0.24%. Por otro lado, en la tierra con porcentajes de humedad del 25% al 35%, el error de profundidad de plantado fue de $3.1 * 10^{-3}$ *cm*, lo que equivale a un error porcentual del 0.31%.

5. Conclusiones

Primero se puede llegar a concluir que se logró desarrollar una estructura sólida incluso una altura adecuada evitando obstruir el crecimiento de las plantas. Los componentes utilizados son de fácil adquisición, permitiendo así darle adaptabilidad al prototipo frente a factores de huertos y agroindustrias.

En segundo lugar, el prototipo se pudo definir a este punto como una máquina multifuncional pudiendo intercambiar herramientas de trabajo como lo son las herramientas intercambiables de monturas debido a que el acople a estas mismas es mediante imanes ubicados en las herramientas e incluso permitir la expansión o el desarrollo de más herramientas.

En tercer lugar, la realización del prototipo para la gestión automática de tareas del huerto, se plantean mejoras que se puedan realizar para posibles trabajos futuros gracias a el uso de dispositivos de hardware libre, uno de las posibles mejoras podría ser optimizar el uso de agua, mejorar la calidad de cultivo, medir el nitrógeno en el suelo y la medición de sustratos orgánicos o sustratos inertes, ideales para tierra ricas en nutrientes, también mediante reconocimiento de imágenes se podría monitorizar la madurez de las plantas o frutos, incluso poder determinar el nacimiento no deseado de plagas.

Se comprobó que el error de desplazamiento del motor en cada eje si es afectado por la configuración de pasos del controlador A4988, y a su vez se minimizó el error de desplazamiento con su configuración a una mayor cantidad de pasos denotando un error de desplazamiento inferior al 1%.

Por un lado, a la hora de plantar se pudo establecer que de acuerdo al porcentaje de humedad en la tierra esta misma toma características que influyen en la precisión de profundidad de plantado, sin embargo, denota un error porcentual menor al 1%.

Se determinó que el aumento de temperatura en los motores de los ejes X, Y y Z sometidos a un funcionamiento continuo a una corriente de $0.4A$, no denotan temperaturas altas que puedan provocar un daño por sobrecalentamiento en estos mismos. Los motores funcionaron y resultaron más eficientes ya que en Farmbot se utilizó motores con una corriente de $1.68A$, por lo tanto, se obtuvo un consumo de $4.8W$ en relación a los $20.16W$ presentando una disminución de consumo por motor de $15.36W$.

Finalmente se cumplió con cada uno de los objetivos, puesto que se validó numéricamente el funcionamiento de la máquina CNC, también se sembró Zanahoria y se determinó la frecuencia de riego definido por las condiciones climáticas de la región, así mismo se demostró el error de desplazamiento en cada uno de sus eje en diferentes configuraciones, además se reutilizó el código fuente Marlin y Sprinter para calibrar el prototipo, cabe destacar que la calibración para el desplazamiento en sus ejes se ve directamente afectado por factores como: poleas, y tensión en sus correas GT3, por lo tanto se recomienda realizar un mantenimiento periódico de sus componentes y de tensión de correas.

6. Referencias Bibliográficas

Ahmad, ata jaber. (n.d.). *Diseño de un huerto destinado al autoconsumo*.

B. Marín Fabián. (2012). *Control Numérico Computarizado*.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Manual Zanahoria, Programa de apoyo agrícola y agroindustrial vicepresidencia de fortalecimiento empresarial*.

Caro Cardona, I. F. (2014). *CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DE SUELOS*.

Dwi Putro S. Setyohadi, H. Riskiawan, & R. Firgiyanto. (2020). Farming Bot: Precision Agriculture System in Limited Land Based Computaer Numerical Control (CNC). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* .

Engels, J. H. gardens. (2002). *A genetic resources perspective*. 3–9.

Forero-Ulloa, F. E., Cely-Reyes, G. E., & Neira-Rodríguez, E. (2015). Requerimientos hídricos de la zanahoria (*D. carota* L.) durante tres etapas de su desarrollo. In *Rev Cien Agri* (Vol. 12, Issue 2).

Guadalupe Hernández Campuzano, A. (2014). *Huertos familiares una estrategia para la sustentabilidad y seguridad alimentaria: Aplicado en la comunidad de Santa Maria del Monte; Zinacantepec, Estado de México*.

Guerra, E., & Hernan, A. (2019). *Diseño y construcción de un sistema cartesiano autónomo de siembra urbana de tres grados de libertad con cambio automático de herramienta*.

- Guerra Enrique, & Hernán Andrés. (2019). *Diseño y construcción de un sistema cartesiano autónomo de siembra urbana de tres grados de libertad con cambio automático de herramienta.*
- Joan Camilo Gómez. (2018). *Establecimiento de huertas de autoconsumo una alternativa bioamigable y comprometida con los grupos vulnerables del municipio de Facatativá.*
- Julián Vivas. (2017, December 6). *Expansión urbana de ciudades de Colombia en los últimos 20 años.* El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/expansion-urbana-de-ciudades-de-colombia-en-los-ultimos-20-anos-153806>
- Lardizábal, R. (10 C.E.). *Manual de producción de zanahoria.* www.fintrac.com
- Mahmudul Hasan, Syed Maksud Hossain, Mohammad Saad Ur Rahman, & M.M. Sakib Ullah. (2017). *Farm Automation System With IOT Application.* University Dhaka.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Cómo determinar;Cuánto y cuándo regar.*
- Ollero Baturone, & Aníbal. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles.*
- R. Landon Aronson. (2013). *Humanity's open source automated precicios farming machine.* <https://drive.google.com/file/d/0B-wExYzQcnp3ZWxheXgwRU1yVkU/view>
- Rory Landon Aronson, & FarmBot Team. (2015). *How much food can Farmbot grow.* <http://wiki.farmbot.org/farming/plant-directory>
- Rubio Salvador Pedro. (2017). *Sistema mecatrónico para la gestion automatica de un huerto de autoabastecimiento basado en la propuesta Farmbot.*

S. Suakanto, V. J. L. E., & M. Hutagalung and D. Angela. (2016). Sensor networks data acquisition and task management for decision support of smart farming. *International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, 1–5.

Şahin Bülbül, M. (2017). *A Universal Design for Robotics*.

<https://www.researchgate.net/publication/313406058>

Siddique, T., Barua, D., Ferdous, Z., & Chakrabarty, A. (2017). Automated farming prediction. *Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*.

Team Farmbot. (n.d.-a). *Exploring the Carbon Footprint of Farmbot*. Retrieved March 26, 2023, from <https://farm.bot/pages/footprint>

Team Farmbot. (n.d.-b). *Farm Designer*. Retrieved March 26, 2023, from <https://software.farm.bot/docs/farm-designer>

Vicente, L., & Useche, V. (2018). *Diseño de Elementos de Máquinas*.

Weather Atlas. (2022). *Previsión meteorológica mensual* . <https://www.weather-atlas.com/es/colombia/bogota-clima>

Weatherspark. (2022). *Clima y tiempo anualmente en Soacha*.

<https://es.weatherspark.com/y/23345/Clima-promedio-en-Soacha-Colombia-durante-todo-el-año>