



**Desarrollo de un prototipo sembrador  
automático de precisión de zanahoria (*Daucus  
carota*) Var. chantenay para mediana  
producción**

**Luna Irene León Herrera**  
**Érika Vivina Rueda Mojica**

Universidad El Bosque  
Facultad de ingeniería, Programa de Bioingeniería  
Bogota D.C., Colombia  
2020



**Desarrollo de un prototipo sembrador  
automático de precisión de zanahoria (*Daucus  
carota*) Var. chantenay para mediana  
producción**

**Luna Irene León Herrera**

**Érika Vivina Rueda Mojica**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Bioingeniero**

Tutor:

Mario Fernando Jimenez Hernández

Cotutor:

María Eugenia Rodríguez Acevedo

Bogota D.C., Colombia

2020



# Contenido

<b>Lista de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>1. Planteamiento del problema</b>	<b>4</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>9</b>
3.1. Objetivo General . . . . .	9
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	9
<b>4. Marco referencial</b>	<b>10</b>
4.1. Marco teórico . . . . .	10
4.1.1. Contexto nacional de la zanahoria . . . . .	10
4.1.2. Categorización de los productores en Colombia . . . . .	11
4.1.2.1. Mediano productor de zanahoria en Colombia . . . . .	14
4.1.3. Agricultura de precisión en la siembra de zanahoria . . . . .	15
4.1.4. Cultivo de zanahoria . . . . .	16
4.1.4.1. Sistema radicular . . . . .	18
4.1.4.2. Ciclo fenológico . . . . .	19
4.1.4.3. Sistemas de siembra . . . . .	21
4.1.4.4. Terreno de cultivo . . . . .	23
4.1.4.5. Características de la zanahoria Chantenay . . . . .	23
4.1.5. Robot móvil . . . . .	24
4.1.5.1. Tipos de locomoción . . . . .	24
4.1.5.2. Configuraciones de robot móvil . . . . .	27
4.1.6. Sistema de navegación . . . . .	30
4.1.6.1. IMU (Unidad de medida Inercial) . . . . .	31

4.1.6.2.	Sensores de velocidad . . . . .	32
4.1.6.3.	Sistema de control . . . . .	33
4.1.6.4.	Técnica de sintonización Algoritmo genético para PID . . . . .	34
4.1.6.5.	Integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (IAET) . . . . .	36
4.1.6.6.	Estimación del error cinemático (KTE) . . . . .	36
4.1.6.7.	ROS . . . . .	37
4.2.	Antecedentes . . . . .	37
<b>5.</b>	<b>Metodología</b>	<b>40</b>
5.1.	Primera etapa: Diseño del prototipo sembrador . . . . .	41
5.1.1.	Entrevista a cultivadores . . . . .	42
5.1.2.	Identificación del terreno de cultivo de zanahoria . . . . .	44
5.1.3.	Requerimientos . . . . .	45
5.1.3.1.	Requerimientos Funcionales . . . . .	45
5.1.3.2.	Requerimientos Operacionales . . . . .	46
5.1.3.3.	Requerimientos de Calidad . . . . .	46
5.1.4.	Estructura del Robot Móvil . . . . .	46
5.1.4.1.	Sistema de locomoción . . . . .	47
5.1.4.2.	Configuración del robot . . . . .	48
5.1.4.3.	Nivel de autonomía del robot móvil . . . . .	49
5.1.4.4.	Sistema de navegación . . . . .	50
5.1.4.5.	Materiales a utilizar . . . . .	50
5.1.5.	Sistema de Siembra . . . . .	51
5.1.5.1.	Método de excavación . . . . .	51
5.1.5.2.	Método de posicionamiento y cantidad de semilla . . . . .	52
5.1.5.3.	Método de cubrimiento de semilla . . . . .	53
5.1.5.4.	Selección de los componentes electrónicos . . . . .	54
5.2.	Segunda etapa: Implementación del prototipo sembrador . . . . .	56
5.2.1.	Construcción del prototipo . . . . .	57
5.2.2.	Caracterización de la Planta . . . . .	57
5.2.3.	Sistema de navegación del prototipo . . . . .	60
5.2.3.1.	Control de alto nivel . . . . .	60
5.2.3.2.	Control de bajo nivel . . . . .	64
5.2.4.	Implementación del seguidor de camino . . . . .	68
5.2.4.1.	Adquisición de datos de los sensores . . . . .	68
5.2.4.2.	Procesamiento de datos en la Raspberry (seguidor de camino) . . . . .	71
5.2.4.3.	Lectura de señal de control en Arduino . . . . .	73

---

5.3.	Tercera etapa: Evaluación del prototipo sembrador . . . . .	73
5.3.1.	Funcionamiento del prototipo . . . . .	74
5.3.1.1.	Estrategia de control . . . . .	74
5.3.1.2.	Sistema de siembra . . . . .	74
<b>6.</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>75</b>
6.1.	Primera etapa: Diseño del prototipo sembrador . . . . .	75
6.1.1.	Estructura del robot móvil . . . . .	75
6.1.1.1.	Sistema de locomoción . . . . .	75
6.1.1.2.	Configuración del robot . . . . .	75
6.1.1.3.	Nivel de autonomía del robot móvil . . . . .	76
6.1.1.4.	Sistema de navegación . . . . .	76
6.1.1.4.1.	Cámara . . . . .	76
6.1.1.4.2.	Sensores ultrasónicos . . . . .	78
6.1.1.4.3.	Sistema de navegación espacial . . . . .	78
6.1.1.5.	Materiales a utilizar . . . . .	79
6.1.2.	Sistema de siembra . . . . .	80
6.1.2.1.	Método de excavación . . . . .	80
6.1.2.2.	Método de posicionamiento y cantidad de semilla . . . . .	80
6.1.2.3.	Método de cubrimiento de semilla . . . . .	81
6.1.2.4.	Materiales a utilizar . . . . .	81
6.1.3.	Diseño final del prototipo CAD . . . . .	82
6.2.	Segunda etapa: Implementación del prototipo sembrador . . . . .	84
6.2.1.	Prototipo construido . . . . .	84
6.2.1.1.	Sistema de siembra . . . . .	84
6.2.1.2.	Estructura del robot móvil . . . . .	85
6.2.1.3.	Prototipo completo . . . . .	87
6.2.1.4.	Mecánica del sistema de siembra del robot móvil . . . . .	88
6.2.2.	Caracterización de la planta . . . . .	90
6.2.3.	Sistema de navegación del prototipo . . . . .	94
6.2.3.1.	Control de alto nivel . . . . .	95
6.2.3.2.	Control de bajo nivel . . . . .	96
6.2.3.3.	Sintonización con Algoritmo Genético . . . . .	97
6.3.	Tercera etapa: Evaluación del prototipo sembrador . . . . .	100
6.3.1.	Funcionamiento del prototipo . . . . .	100
6.3.2.	Estrategia de control . . . . .	103
6.3.3.	Sistema de siembra . . . . .	104
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>115</b>
<b>8.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>116</b>

---

<b>A. Anexo A: Diseños del prototipo</b>	<b>117</b>
<b>B. Anexo B: Planos del prototipo sembrador</b>	<b>120</b>
<b>C. Anexo C: Archivos de programación del control de alto y bajo nivel</b>	<b>133</b>
<b>D. Anexo D: Algoritmo Genético</b>	<b>141</b>
<b>E. Anexo E: Presupuesto</b>	<b>144</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>145</b>

# Lista de Figuras

1-1. Árbol del problema . . . . .	6
4-1. Producción de zanahoria en Colombia [(CCI), 2010]. . . . .	10
4-2. Área cultivada y producción de zanahoria en Colombia 2013 [Agronet, 2015].	11
4-3. Escenario de producción de la zanahoria con y sin tecnificación . . . . .	15
4-4. Efecto de la precisión en la densidad de siembra [Kabir, 2013]. . . . .	16
4-5. Desarrollo del sistema radicular de la zanahoria. [Seminis, 2017] . . . . .	18
4-6. Partes de la raíz de la zanahoria [CASTRO, 2014] . . . . .	19
4-7. Zanahoria Chantenay y su respectiva semilla [zonAgricola, 2014] [Sembrando biodiversidad, 2010]. . . . .	23
4-8. Robot con locomoción por medio de patas [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	24
4-9. Robot con locomoción por medio de Ruedas [(AADECA) Asociación Argen- tina de Control Automático, 2008] . . . . .	25
4-10. Robot con locomoción por medio de oruga [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	25
4-11. Rueda tipo fija [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	26
4-12. Rueda tipo orientable centrada [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	26
4-13. Rueda tipo orientable centrada [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	27
4-14. Rueda tipo sueca [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	27
4-15. Robot omnidireccional con ruedas suecas y con ruedas orientables centradas [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	28
4-16. Estructura de un robot unicycle [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	29
4-17. Estructura de un robot triciclo [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	29
4-18. Sistema de dirección Ackerman [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] . . . . .	30
4-19. Sistema de navegación . . . . .	30

4-20.	Configuración interna IMU [CEVA, 2013] . . . . .	31
4-21.	Toma de datos grados de libertad IMU [Systems, 2013] . . . . .	32
4-22.	Configuración del encoder [Control, 2011] . . . . .	32
4-23.	Fases A y B del encoder [Dynapar, 2010] . . . . .	33
4-24.	Componentes de un algoritmo genético [Colorado Arellano Othon, 2018]. . .	35
4-25.	Entrada de punto de control [Fierro, b] . . . . .	36
5-1.	Diagrama de flujo actividades para definir el diseño . . . . .	41
5-2.	Cultivo de zanahoria, etapa inicial . . . . .	45
5-3.	Cultivo de zanahoria, etapa inicial . . . . .	45
5-4.	Peso del prototipo obtenido del CAD . . . . .	55
5-5.	Diagrama de flujo actividades para definir la implementación . . . . .	56
5-6.	Diagrama de flujo del proceso de caracterización del motor. . . . .	57
5-7.	Pico de corriente (A) motor 1 . . . . .	58
5-8.	Pico de corriente (A) motor 2 . . . . .	59
5-9.	Pico de corriente (A) motor del sistema de siembra . . . . .	59
5-10.	Representación gráfica de las modificaciones de L y K en la función $h$ . . . .	62
5-11.	Diagrama de flujo del funcionamiento general del robot móvil . . . . .	65
5-12.	Seudo-código del Algoritmo Genético implementado . . . . .	67
5-13.	Diagrama de flujo del funcionamiento general del robot móvil . . . . .	68
5-14.	Diagrama de flujo adquisición de datos de los sensores . . . . .	69
5-15.	Diagrama de flujo adquisición de datos de los sensores . . . . .	71
5-16.	Diagrama de flujo adquisición de datos de los sensores . . . . .	72
5-17.	Diagrama de flujo actividades para definir la evaluación . . . . .	73
6-1.	Imagen tomada en el terreno real de cultivo de zanahoria . . . . .	77
6-2.	Imagen en el espacio de color HSV . . . . .	77
6-3.	Imagen en el espacio de color LAB . . . . .	78
6-4.	Posicionamiento de los sensores ultrasónicos en el terreno . . . . .	78
6-5.	Diagrama de bloques de la navegación del robot movil . . . . .	79
6-6.	Vista isométrica del diseño final . . . . .	82
6-7.	Vista frontal del diseño final . . . . .	82
6-8.	Vista lateral del diseño final . . . . .	83
6-9.	Vista superior del diseño final . . . . .	83
6-10.	Vista trasera del diseño final . . . . .	83
6-11.	Vista superior del sistema de siembra . . . . .	84
6-12.	Vista frontal del sistema de siembra . . . . .	84
6-13.	Vista inferior del sistema de siembra . . . . .	85
6-14.	Acople del motor en el sistema de siembra . . . . .	85
6-15.	Acople del motor a la rueda de control . . . . .	86
6-16.	Vista frontal del prototipo construido . . . . .	87

---

6-17.Vista lateral del prototipo construido . . . . .	87
6-18.Vista trasera del prototipo construido . . . . .	88
6-19.Vista superior del prototipo construido . . . . .	88
6-20.Diagrama de flujo de la mecánica del sistema de siembra . . . . .	89
6-21.Porcentaje de similitud de la estimación dada por PID TURNER, motor 1 . . . . .	90
6-22.Respuesta ante una entrada paso del motor 1 . . . . .	91
6-23.Porcentaje de similitud de la estimación dada por PID TURNER, motor 2 . . . . .	92
6-24.Respuesta ante una entrada paso del motor 2 . . . . .	93
6-25.Porcentaje de similitud de la estimación dada por PID TURNER, motor del sistema de siembra . . . . .	93
6-26.Simulación del controlador con función Turtlesim de ROS . . . . .	95
6-27.Camino recorrido por el prototipo . . . . .	96
6-28.Control proporcional-integral motor2 . . . . .	97
6-29.Respuesta ante una entrada paso del motor 1 con control PID implementado . . . . .	98
6-30.Respuesta ante una entrada paso del motor 2 con control PID implementado . . . . .	99
6-31.Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo . . . . .	100
6-32.Simulación de camino con obstaculos . . . . .	104
6-33.Respuesta del prototipo a obstaculos . . . . .	104
6-34.Simulación de ERA . . . . .	105
6-35.Líneas continuas realizadas por el cincel del robot . . . . .	106
6-36.Profundidad realizada por el cincel del prototipo . . . . .	106
6-37.Cantidad de semilla distribuida . . . . .	107
6-38.Área de siembra del robot . . . . .	109
6-39.Área de siembra al voleo . . . . .	109
6-40.Área de siembra al chorrillo y golpe . . . . .	110
6-41.Distancias de plantación . . . . .	110
6-42.Diagrama de dispersión de las distancias horizontales tomadas . . . . .	111
6-43.Diagrama de dispersión de las distancias verticales tomadas . . . . .	112
A-1. Primer diseño del prototipo . . . . .	117
A-2. Segundo diseño del prototipo . . . . .	118
A-3. Tercer diseño del prototipo . . . . .	119
E-1. Presupuesto estimado del robot sembrador de zanahoria . . . . .	144



# Lista de Tablas

4-1. Promedio del valor UAF en los principales departamentos productores de zanahoria (Autoría propia) . . . . .	12
4-2. Tipo de productor de acuerdo al promedio en hectáreas del valor UAF en los principales departamentos productores de zanahoria (Autoría propia) . . . . .	13
4-3. Tipo de productor de acuerdo al promedio en hectáreas del valor UAF específico de la zanahoria (Autoría propia) . . . . .	14
4-4. Requerimientos del cultivo de zanahoria [Pollock, 2003] [Gloria Helena González Blair, 2010] [(EDA) Entrenamiento y Desarrollo de Agricultores, 2007] . . . . .	17
4-5. Fases del ciclo fenológico de la zanahoria [García, 2014] [Rojas et al., 2011]	20
4-6. Tipos de siembra [DIACONIA, 2017] [Instituto Colombiano Agropecuario, 1977] [Pollock, 2003] . . . . .	22
5-1. Respuestas a la entrevista realizada a los tres cultivadores . . . . .	43
5-2. Características del terreno para el diseño del prototipo . . . . .	44
5-3. Requerimientos y su relevancia . . . . .	47
5-4. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	47
5-5. Requerimientos y su relevancia . . . . .	48
5-6. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	49
5-7. Requerimientos y su relevancia . . . . .	49
5-8. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	50
5-9. Requerimientos y su relevancia . . . . .	51
5-10. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	51
5-11. Requerimientos y su relevancia . . . . .	52
5-12. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	52
5-13. Requerimientos y su relevancia . . . . .	53
5-14. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	53
5-15. Requerimientos y su relevancia . . . . .	54
5-16. Ponderación a partir de requerimientos . . . . .	54
6-1. Características del seguidor de camino . . . . .	96
6-2. Resultados de la evaluación a través de MBF para establecer parámetros de entrada algoritmo genético . . . . .	97
6-3. Parámetros del algoritmo genético . . . . .	98
6-4. Valores de las constantes del PID motor 1 . . . . .	98

<b>6-5.</b> <i>Valores de las constantes del PID motor 2</i> . . . . .	99
<b>6-6.</b> <i>Consumo energético de los motores</i> . . . . .	101
<b>6-7.</b> <i>Resultados prueba de siembra</i> . . . . .	107
<b>6-8.</b> <i>Distancias verticales y horizontales de 10 siembras escogidas aleatoriamente</i>	111
<b>6-9.</b> <i>Evaluación del prototipo sembrador</i> . . . . .	113

# Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>SSIM</i>	Índice de similitud estructural

# Resumen

La zanahoria es una hortaliza de raíz, lo que quiere decir que crece debajo del suelo, absorbiendo el agua y los nutrientes presentes para el crecimiento y posterior engrosamiento de su raíz principal, esto precisamente le confiere la necesidad de contar con una densidad de siembra que no limite el desarrollo de dicha raíz y por ende el del resto de la planta [Pollock, 2003]. Por esta razón durante este proyecto se propuso realizar un robot móvil diseñado para mantener las distancias y profundidad de plantación para el cultivo de zanahoria (*Daucus carota*) Var. Chantenay para medianos productores. Para esto fue necesario realizar una revisión conceptual y física de los requerimientos a tener en cuenta, por medio de literatura y visitas a las fincas en donde se cultiva esta variedad específicamente, una vez estructurados dichos requerimientos se realizó el diseño del robot móvil y el sistema de siembra inmerso en ella, definiendo materiales a utilizar y los componentes electrónicos necesarios, incluyendo, Arduino, Raspberry pi3, regulador de voltaje y sensor inercial (IMU).

Posterior a esto, se implementó el diseño del robot móvil, en primer lugar, se caracterizaron los motores, para identificar el pico de corriente máximo y escoger las baterías, en segundo lugar, se obtuvo la función de transferencia y se realizó un primer diseño de los posibles controladores de bajo nivel a utilizar, en donde se simularon las diferentes opciones como control proporcional, derivativo, integral y combinaciones entre estos para escoger el que mejor se adaptara a la planta. Una vez realizadas estas simulaciones se desarrolló el control de alto nivel utilizando el método de seguidor de camino, en donde el camino se interpretó como una sucesión de puntos a seguir, manteniendo la velocidad tangente al camino.

Por último, se evaluó el sistema de siembra en el espacio de prueba diseñado y el controlador del robot. Se evidenció que el promedio de distancias horizontales se encontraba dentro de los rangos esperados mientras que en el promedio de distancias verticales no superó 1cm de diferencia respecto al ideal, por su parte, la profundidad de siembra fue correcta y la cantidad de semilla depositada varió entre 2 y 3 semillas por siembra, adicionalmente su desempeño durante el recorrido fue estable, garantizando el trayecto en línea recta, por lo cual es posible afirmar que se cumplieron los objetivos planteados.

**Palabras clave:** Densidad de siembra, Zanahoria, Robot móvil, Seguidor de camino.

# Abstract

The carrot is a root vegetable, which means that it grows below the ground, absorbing the water and nutrients present for the growth and subsequent thickening of its main root, this precisely gives it the need to have a planting density that do not limit the development of this root and therefore that of the rest of the plant. cite tablazan. For this reason, during this project, it was proposed to carry out a mobile robot designed to maintain planting distances and depth for the cultivation of carrots (*Daucus carota*) Var. Chantenay for medium producers. For this it was necessary to carry out a conceptual and physical review of the requirements to be taken into account, through literature and visits to the farms where this variety is specifically cultivated, once these requirements were structured, the design of the mobile robot and the system was carried out of seeding immersed in it, defining materials to use and the necessary electronic components, including, Arduino, Raspberry pi3, voltage regulator and inertial sensor (IMU).

After this, the design of the mobile robot was implemented, first, the motors were characterized, to identify the maximum current peak and choose the batteries, second, the transfer function was obtained and a first design of the possible low-level controllers to use, where the different options such as proportional, derivative, integral control and combinations between these were simulated to choose the one that best suited the plant. Once these simulations were carried out, the high-level control was developed using the path follower method, where the path was interpreted as a succession of points to follow, maintaining the tangent speed to the path.

Finally, the seeding system in the designed test space and the robot controller were evaluated. It was evident that the average of horizontal distances was within the expected ranges, while the average of vertical distances did not exceed 1cm difference from the ideal, for its part, the planting depth was correct and the amount of deposited seed varied between 2 and 3 seeds per sowing, additionally their performance during the tour was stable, guaranteeing the journey in a straight line, which is why it is possible to affirm that the stated objectives were met.

**Key words:** Planting density, Carrot, Mobile Robot, Path Following.

# Introducción

Las hortalizas de raíz especialmente requieren espaciamientos muy específicos a la hora de sembrarse, como en el caso de la zanahoria, sin embargo, actualmente los tipos de siembra utilizados como el voleo, la línea continua o a golpes, son de manera general, métodos inexactos que pueden llegar a afectar ampliamente el desarrollo de la planta en términos de baja densidad radicular, raíces bifurcadas o deformes y/o poca profundidad de la misma, generando déficit hídrico y deficiencias nutricionales. Por ello, se deben utilizar mecanismos que garanticen su densidad de siembra, permitiendo que esta tenga un uso eficiente de los recursos, lo cual se ve reflejado en el crecimiento de su raíz principal, que es finalmente el órgano de consumo.

Para evitar esto, es posible utilizar tractores que permitan manejar la densidad de siembra de una forma más exacta, pero por su peso, en su mayoría los cultivadores lo evitan, ya que una de las exigencias de la zanahoria es un suelo aireado, por lo que disponer maquinaria grande o pesada puede llegar a compactarlo. Teniendo en cuenta lo que implica realizar la siembra de zanahoria de manera incorrecta en términos de densidad de siembra y utilizar este tipo de maquinaria, se propuso desarrollar un prototipo de robot móvil que permite definir distancias y profundidades de siembra mediante un sistema que selecciona la cantidad y las dispone a las distancias y profundidades deseadas, mejorando el rendimiento del producto y la minimización del laboreo en la tarea de siembra.

Dicho sistema de siembra está conformado por una tolva que contiene las semillas, las cuales son dispuestas en un rodillo que cuenta con orificios idealmente realizados para que se depositen dos semillas por siembra, a partir de esto, por medio del movimiento de un motor, el rodillo se direcciona hacia el suelo siguiendo el trayecto a través de unas mangueras de plástico. Todo esto utilizando un seguidor de camino que determina la distancia a la cual el robot debe detenerse y realizar el proceso anteriormente mencionado, generando un control independiente para cada una de las ruedas traseras alcance el punto requerido a partir de la información brindada por los sensores.

# 1. Planteamiento del problema

El crecimiento poblacional hace que sea de vital importancia trabajar en la seguridad alimentaria a través de la producción de alimentos de calidad, que sean sanos, nutritivos e inocuos [(DNP) Departamento Nacional de Planeación, 2015]. Las hortalizas por su parte, se encuentran dentro de los alimentos comunes y recomendados en la canasta familiar colombiana, entre las cuales la zanahoria tiene un nivel de preferencia del 28 % y una cantidad diaria de consumo de aproximadamente 30 gramos, siendo incluida en la Visión 2019 del plan hortícola nacional (PHN) para ampliar el área sembrada e incrementar la producción por su posición competitiva y alta demanda a nivel nacional e internacional. [(CCI), 2010] Sin embargo, más allá de apostar a la extensión del cultivo, es necesario mejorar el rendimiento en tonelada por hectárea de zanahoria, aumentando y unificando las cifras entre los departamentos productores del país, lo cual depende directamente de una interacción entre la variedad utilizada, la población de las plantas o densidad de siembra y las condiciones de crecimiento [(CCI), 2010].

Dicha comercialización de zanahoria en Colombia, alcanzó un récord en producción de 28,5 toneladas por hectárea en 2017 (siendo Boyacá y Cundinamarca los que encabezan la lista de producción) frente a algunos productores mundiales que alcanzan hasta 100 toneladas por hectárea, apoyados en tecnificación y nuevas formas de producción que controlan características específicas para la obtención del producto deseado [Agronegocio, 2018]. Cabe resaltar que la etapa decisiva para el correcto desarrollo de una planta, es el método o técnica de siembra, especialmente cuando se trata de cultivos exigentes en el tema de homogeneidad para la siembra de determinados cultivos, como en el caso específico de la zanahoria, pues requiere que se garanticen las distancias entre plantaciones y su respectiva profundidad [P. J. SALTER and FELLOWS, 1979]. Si bien pareciera que estos factores no son relevantes, resultan ser fundamentales y determinantes en el desarrollo de la planta, ya que la raíz primaria y en general el 80 % de la totalidad de la planta se desarrollan en la primera etapa fenológica [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015], dependiente precisamente de dicha técnica de siembra. La importancia de ello se ve reflejada en la disponibilidad de agua y nutrientes, el porcentaje de germinación de las semillas, el tamaño de la planta y, así mismo, la productividad y rendimiento del cultivo [BO LI, 1976] [Shiberu, 2016].

El tipo de siembra también influye en la cantidad de semilla a utilizar y por ende en la cantidad de insumos, por ejemplo, la siembra tradicional al voleo utiliza entre 4,5 y 6 kg/ha de

semillas, mientras que la siembra mecanizada de 2,5 a 3 kg/ha [Anasac, 2011], este valor está vinculado con el porcentaje de germinación de la semilla, ya que en las técnicas tradicionales al no ser distribuida uniformemente, es más difícil que todas germinen por cuestiones de alta densidad de siembra generando competencia entre plantas por recursos tales como nutrientes y agua, por ende el porcentaje de germinación es menor y es necesario distribuir más semillas para al final obtener la misma cantidad de productos, sin embargo, no basta con cuánto se produce sino además, es importante reconocer características fundamentales en la zanahoria, como por ejemplo el tamaño o la forma, para su posterior comercialización [P. J. SALTER, 1981].

Para corregir esto, actualmente se emplean apoyos con dispositivos empíricos o maquinaria agrícola que puede resultar grande y costosa, la primera en cualquiera de sus presentaciones por lo general carece de exactitud y la última resulta ser un inconveniente a la hora de sembrar en terrenos irregulares y termina compactando el suelo. Al requerir el cumplimiento de las distancias de siembra, es necesario que haya un manejo adecuado en la densidad y en la profundidad de plantación, lo que no ocurre en la práctica tradicional [Gaviola, 2018] [POVEDA, 2019].

En general, la falta de alternativas de tecnificación sostenibles en el proceso de siembra de zanahoria disminuyen la posibilidad de obtener la cantidad y características esperadas en el producto, por lo que se ve afectada la labor de quienes invierten en sus cultivos de zanahoria para al final no obtener los resultados esperados [CASTRO, 2014]. Existe la necesidad de aportar sosteniblemente en los procesos de siembra, a través de la implementación de herramientas de apoyo agrícola (El Tiempo, 2017), disminuyendo así la dependencia manual y los errores presentes en dicha etapa de siembra que definen gran parte del desarrollo de la planta.

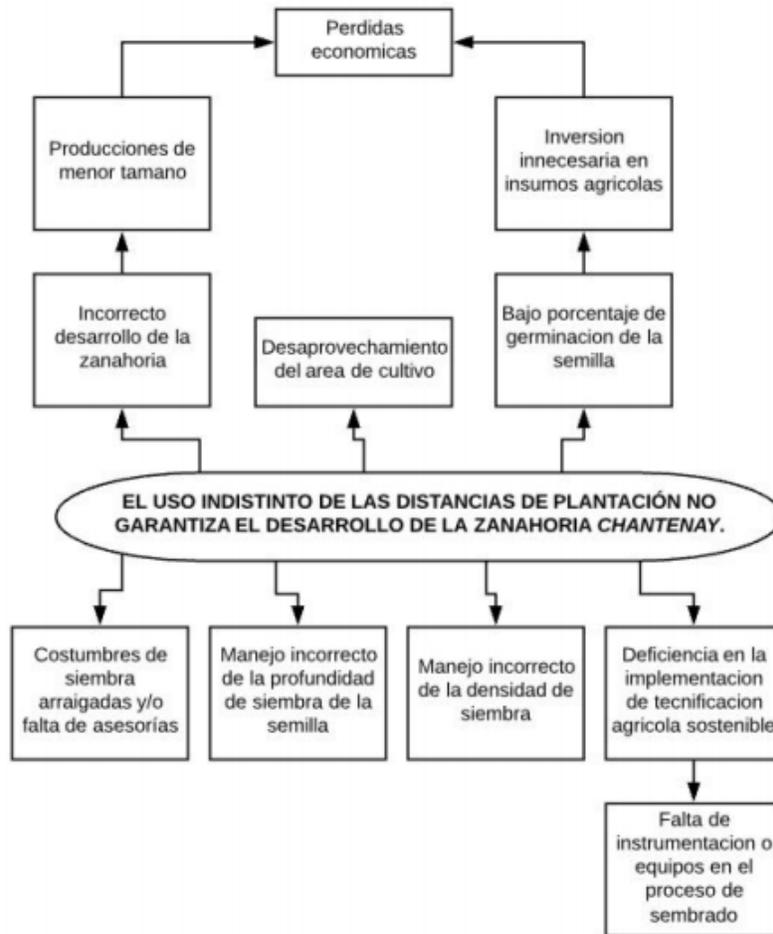


Figura 1-1.: Árbol del problema

## 2. Justificación

Las proyecciones muestran un aumento de la población mundial de 9.100 millones de personas en 2050, esto implica directamente un aumento importante en la producción de alimentos básicos fundamentales en la canasta familiar. (FAO, 2009) Por ello, existe la necesidad de aumentar la producción agrícola con enfoque sostenible y que contribuyan a brindar seguridad alimentaria, con alimentos sanos, nutritivos e inocuos, tal como lo son las hortalizas, las cuales han aumentado su demanda y se han convertido en un componente básico de las nuevas tendencias del consumidor debido a su alto contenido de minerales y vitaminas [DINERO, 2016] [Unisef, 2018]. Dicho aumento de producción puede llegar a ser posible por medio de alternativas que impulsen la automatización y el uso adecuado de los recursos naturales a su disposición, haciendo más eficientes algunas prácticas en los procesos productivos agrícolas. A partir de esto, es posible aprovechar el terreno, optimizando el uso del suelo teniendo en cuenta que los métodos tradicionales no limitan correctamente las siembras, y generando mayor cantidad de productos sin repercutir de manera negativa en las características del suelo [A.M. EVERS, 1997] [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015].

El uso de técnicas avanzadas de cultivo, específicamente de precisión, se ve reflejado en la rentabilidad del mismo, pues al controlar distancias y la profundidad en el proceso de siembra aumentan las posibilidades de obtener mejor rendimiento del cultivo minimizando el laboreo y manteniendo o aumentando la productividad por hectárea, además de apostar a la preservación del suelo por medio de buenas prácticas agrícolas utilizadas en el proceso de siembra y evitando la compactación del suelo reemplazando el uso de maquinaria pesada por los sistemas eléctricos pequeños que no generan emisiones [A.M. EVERS, 1997] [Báez, 2018]. Invirtiendo e impulsando en tecnologías agrícolas que permitan mejorar la producción, promoviendo la vida sana y activa apostando a la zanahoria Chantenay como cultivo tradicional en Colombia.

Ya que la siembra es una de las etapas del cultivo que en principio define el correcto desarrollo de la planta, utilizar herramientas automatizadas de precisión permite mantener la profundidad y distancias adecuadas de plantación y la correcta disposición de la semilla a una profundidad deseada, las cuales son características importantes relacionadas con la obtención de nutrientes y agua, decisivas en el producto final; la automatización es una opción pertinente para garantizar la germinación uniforme y alcanzar el desarrollo y la producción deseada de la zanahoria Chantenay, ya que permite controlar dichas características [Gaviola,

2018]. Por lo tanto, se evitaría la reducción en la productividad y las pérdidas económicas en términos de semilla, como ocurre en el tema de la cantidad de semilla utilizada al voleo; además aportaría de manera indirecta a la economía del país, pues la importación de cultivos hortícolas ha aumentado en los últimos años, generando mayor dependencia exterior [(CCI), 2010].

Desde la visión de un bioingeniero, integrar conceptos biológicos, como lo es el correcto desarrollo de la zanahoria Chantenay, con apoyos ingenieriles o herramientas para la siembra de precisión permite garantizar un mejor rendimiento del cultivo en Colombia, realizando un aporte a las tecnologías agrícolas que están siendo utilizadas actualmente, mejorando el rendimiento del cultivo y minimizando el laboreo, ya que es uno de los principales retos de la agricultura [FAO, 2018]. El presente trabajo sugiere como solución la automatización de la etapa de sembrado mediante el desarrollo de un robot móvil que garantice distancias y profundidad de siembra y con ello, el espacio y disponibilidad de nutrientes para un buen desarrollo de la zanahoria.

## 3. Objetivos

### 3.1. Objetivo General

Desarrollar un prototipo automático de precisión que garantice las distancias y profundidad de siembra de zanahoria (*Daucus carota*) Var. Chantenay para medianos productores.

### 3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un prototipo de sembrador automático de semillas de zanahoria Chantenay de acuerdo a las características establecidas para la plantación.
- Implementar un prototipo funcional del sembrador automático para la siembra de zanahoria Var. Chantenay.
- Evaluar la funcionalidad del prototipo sembrador automático de semillas de zanahoria de acuerdo al desempeño durante el recorrido, la cantidad de semilla dispuesta, distancia y profundidad de siembra.

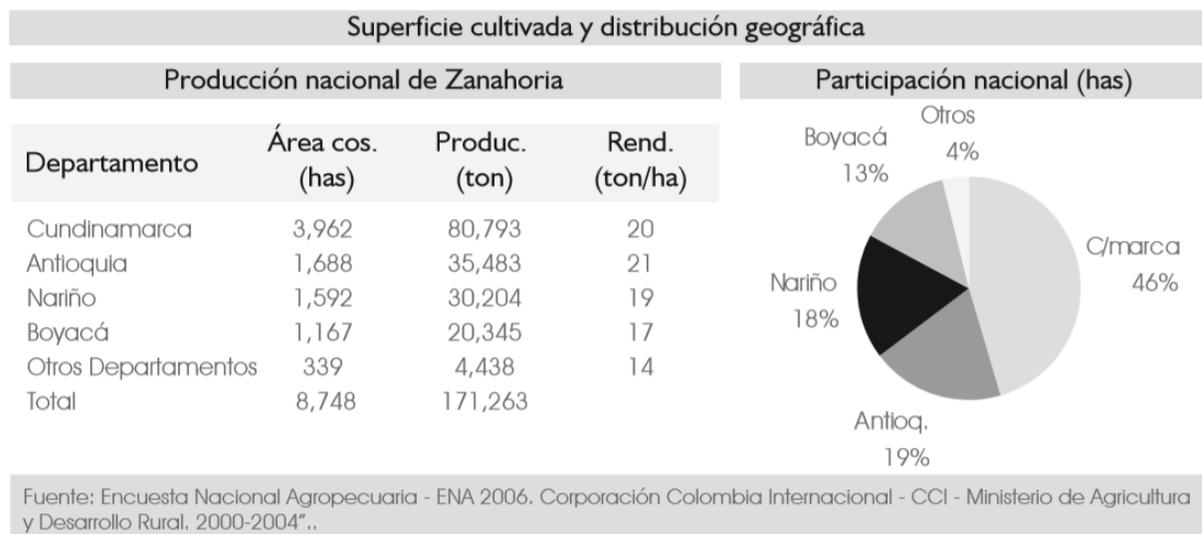
## 4. Marco referencial

### 4.1. Marco teórico

Para desarrollar este proyecto es necesario reconocer las características del componente biológico con el que se desea trabajar, en este caso específico, corresponde a la zanahoria, del cual es importante reconocer y estudiar sus generalidades, los requerimientos del cultivo, las propiedades del suelo, las técnicas de siembra y el desarrollo de su sistema radicular.

#### 4.1.1. Contexto nacional de la zanahoria

En Colombia, la participación nacional de cultivo de zanahoria para el año 2004 principalmente se concentra en los departamentos de Cundinamarca, Antioquia, Nariño y Boyacá, encabezando Cundinamarca con una producción de 80.793 ton, representando un 46 % de la producción en ese año, como se muestra en la Figura 4-1.

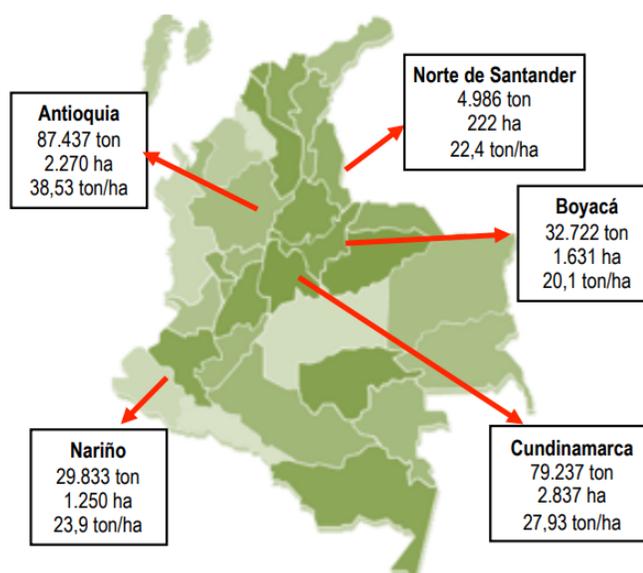


**Figura 4-1.:** Producción de zanahoria en Colombia [(CCI), 2010].

Según el MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) en 2009, de las 33 hortalizas estudiadas, entre las que obtuvieron un mayor volumen producido se encuentra la zanahoria en el tercer puesto con un 16 % seguido del tomate con 29 % la cebolla cabezona con 17 % y el pimiento con 6 % sumando estas cuatro el 78 % de la producción total de hortalizas en el

año. Para el 2010, la zanahoria se sigue posicionando en el tercer puesto con una producción del 15 % seguido del tomate y la cebolla con un 30 y 17 % respectivamente [(SIC) Superintendencia de Industria y Comercio, 2011].

Para el año 2013, el área total sembrada con zanahoria en Colombia correspondió a 8.466,4 hectáreas, con una producción total de 236.834,2 toneladas. En donde se caracterizan como principales departamentos productores de zanahoria Antioquia con 36,9% del total de la producción, Cundinamarca con 33,5% Boyacá con 13,8% Nariño con 12,6% y Norte de Santander con 2,1% Es decir que los primeros cuatro departamentos generaron el 96,8 % de la producción total de zanahoria en Colombia para este año como se puede evidenciar en la Figura 4-2. [Agronet, 2015]



**Figura 4-2.:** Área cultivada y producción de zanahoria en Colombia 2013 [Agronet, 2015].

#### 4.1.2. Categorización de los productores en Colombia

Una manera de categorizar a los productores es por medio de la Unidad Agrícola Familiar (UAF), la cual es una unidad de medida de la concentración de la tierra en Colombia, este concepto se incluye en la Ley 135 de 1961, también conocida como Ley de Reforma Agraria, que define la UAF como una empresa básica de producción agrícola [Obando, 2014] [Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural, 2013]. En donde se explota un fundo, en este caso para uso agrícola, que dependa directa y principalmente de una misma familia compuesta por el jefe del hogar y su cónyuge, o por parientes hasta el segundo grado de consanguinidad y primero civil [Agencia Nacional de Tierras, 2018], esto para permitirle a la familia remunerar su trabajo y disponer de un excedente capitalizable que coadyuve a la formación de su patrimonio [Botia, 2010].

Sin embargo, no existe una clasificación para los productores de zanahoria específicamente, ya que dichas clasificaciones se realizan de manera general para la parte agrícola teniendo en cuenta todos los cultivos presentes en cada departamento, por ello, el valor promedio de UAF en hectáreas por departamento es alto como se puede observar en la tabla 4-1 y por ende, la categorización de micro, pequeña, mediana y gran propiedad también (Ver tabla 4-2). Esto ocurre porque no se tiene en cuenta que los valores de producción varían bastante entre cultivo y cultivo, en comparación con el valor promedio de UAF en hectáreas del cultivo de zanahoria que se obtuvo a partir de los rangos de siembra promedios de los cultivadores y a las entrevistas y visitas realizadas a fincas productoras (Ver tabla 4-3).

**Tabla 4-1.** *Promedio del valor UAF en los principales departamentos productores de zanahoria (Autoría propia)*

<b>Departamento</b>	<b>Promedio Valor UAF (Hectáreas)</b>
Boyacá	13.9
Cundinamarca	14.1
Antioquia	12.2
Nariño	36.3

En la tabla 4-1 se escogieron los departamentos de interés en el estudio, es decir aquellos que representan la mayor producción de zanahoria, posteriormente se realizó un promedio del valor UAF en hectáreas, basado en la resolución 041 de 1996, por la cual se determinan las extensiones de las unidades agrícolas familiares, por zonas relativamente homogéneas [Botia, ]. Cabe resaltar que dichos promedios representan la producción agrícola en general y no de un cultivo en específico.

**Tabla 4-2.:** *Tipo de productor de acuerdo al promedio en hectáreas del valor UAF en los principales departamentos productores de zanahoria (Autoría propia)*

Tipo de productor	Rango UAF	Área promedio en Boyacá (Has)	Área promedio en Cundinamarca (Has)	Área promedio en Antioquia (Has)	Área promedio en Nariño (Has)	Promedio (Has)
Microfundio	< 0,5	< 6,95	< 7,05	< 6,1	< 18,15	< 9,56
Pequeña propiedad	0.5-2	6.95-27.8	7.05-28.2	6.1-24.4	18.15-72.6	9.56-38.25
Mediana propiedad	2-10	27.8-139	28.2-141	24.4-122	72.6-363	38.25-191.25
Gran propiedad	> 10	> 139	> 141	> 122	> 363	> 191,25

La tabla 4-2, determina a partir del valor promedio en hectáreas presentado de cada departamento en la tabla 4-1, el tipo de productor de acuerdo a los rangos UAF [Barón, 2013], como se puede observar el promedio presenta unos valores altos ya que se trata del aspecto agrícola en general y no de la zanahoria específicamente.

#### 4.1.2.1. Mediano productor de zanahoria en Colombia

**Tabla 4-3.:** *Tipo de productor de acuerdo al promedio en hectáreas del valor UAF específico de la zanahoria (Autoría propia)*

Tipo de productor	Rango UAF	Promedio Área (Has)
Microfundio	< 0,5	< 0,4
Pequeña propiedad	0.5-2	0.4-1.6
Mediana propiedad	2-10	1.6-8
Gran propiedad	> 10	> 8

Para realizar la tabla 4-3, se utilizaron datos encontrados en la literatura respectivamente de la producción de zanahoria en hectáreas [DANE, 2017] [FINAGRO, 2019] [Agronet, 2015] [Eladio Rey, 2014]. Debido a que en Colombia no hay una estandarización de estos datos, se realizaron promedios con lo encontrado en dichas fuentes y adicionalmente se tuvieron en cuenta las cifras presentadas por los cultivadores entrevistados para la realización del proyecto, pues finalmente ellos que están directamente involucrados en el proceso conocen cómo se les categoriza.

Los pequeños y medianos productores del país, cultivan hortalizas pensando en que estas especies son de periodo vegetativo corto, intensivos, de alta demanda y gran rentabilidad, haciendo específicamente del cultivo de zanahoria parte de su economía [MONTAÑA, 2016] [Acosta, 2017]. En su mayoría son cultivadores tradicionales, con métodos de siembra adquiridos; en el caso del suministro de productos para el consumo en Bogotá, el 95 % pertenece a esta categoría y el otro 5 % a productores tecnificados. Sin tener en cuenta que apostar a esta tecnificación en un escenario de producción actual de zanahoria en Colombia de manera tradicional, tiene relación costo/ beneficio de 1.67, mientras que en un escenario de producción con mejor tecnología disponible como en Israel, dicha relación aumenta a 1.88, como se puede ver en la Figura 4-3. Este proyecto se enfoca en los medianos productores ya que de acuerdo a lo comentado en las diferentes entrevistas, en su mayoría son quienes realizan este tipo de producción y el espacio de siembra es trabajable en términos de ex-

tensión, pues los pequeños se concentraban en el consumo propio o la venta al por menor, lo que no implica la necesidad de invertir en automatización, pues el espacio es mínimo. Adicionalmente los grandes productores, son específicos y cuentan con otro tipo de ayudas de mayor tamaño que puedan cubrir el terreno deseado en tiempos muy cortos de siembra.

Zanahoria	Escenario de Producción Actual Colombia (Tradicional)	Escenario de Producción con mejor Tecnología Disponible (Israel)
Rendimientos Ton / Ha.	35	45
Costos Por Ha./ Ciclo	\$ 9.400.000	11.000.000
Costo Por Kg.	\$ 268	\$ 244
Precio de Venta Por Kg.	450	450
Ganancia Neta / Ha	\$ 6.370.000	\$ 9.270.000
Relación Beneficio/ Costo	1.67	1.88

**Figura 4-3.:** Escenario de producción de la zanahoria con y sin tecnificación

De las personas que consumen verduras en Colombia, el 50 % consumen zanahoria [García, 2019], siendo la variedad Chantenay la preferida y tradicionalmente cultivada, por sus características, la respuesta que tiene respecto a su producción, presentando un buen comportamiento a bajas temperaturas, color homogéneo y buena conservación, además cumple con las exigencias del mercado y en general es un producto clasificado lo que quiere decir que es de una mejor calidad, permitiendo que sea comprado por los grandes y medianos mercados o consumidores [Murcia, 2006] REF23 [(CCI), 2010] [Gloria Helena González Blair, 2010].

### 4.1.3. Agricultura de precisión en la siembra de zanahoria

La agricultura de precisión hace referencia al uso de tecnologías y principios que permitan manejar de manera correcta los procesos involucrados en la producción agrícola, con la finalidad de mejorar la productividad del cultivo, trabajando desde la sostenibilidad y el uso eficiente de recursos. Las correcciones realizadas a partir de estos métodos tecnificados, pueden ir enfocadas a causas naturales o a variaciones o errores relacionados con el manejo del cultivo, los cuales pueden ocurrir en la siembra, en el establecimiento del cultivo, en la fertilización, daños de herbicidas, daños de enfermedades, entre otros [para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (Procisur), 2018]. En la siembra, la precisión pretende mantener las distancias y profundidades requeridas por la zanahoria, evitando la pérdida de peso de la raíz, mejorando la cantidad de hojas de la planta y manteniendo un crecimiento homogéneo [Kabir, 2013] [Gray, 1994] [P. J. SALTER and FELLOWS, 1979]. Todo esto se refleja en el rendimiento total de la planta [Kabir, 2013].

Diameter of root (cm)					
Spacing	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	Spacing mean
S <sub>1</sub>	13.30bc	11.49de	9.327ef	8.463f	10.65b
S <sub>2</sub>	17.40ab	14.79bc	13.48bc	11.62de	14.32a
S <sub>3</sub>	20.39a	16.67ab	14.45bc	12.38cd	15.97a
Length of root (cm)					
Spacing	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	Spacing mean
S <sub>1</sub>	11.13cd	10.09de	6.974fg	6.143g	8.583b
S <sub>2</sub>	13.09b	11.66bc	8.310ef	6.923fg	9.994ab
S <sub>3</sub>	14.82a	12.33bc	9.930de	7.010fg	11.02a

T<sub>1</sub> = 28 November, T<sub>2</sub> = 8 November, T<sub>3</sub> = 18 December, T<sub>4</sub> = 28 December  
 S<sub>1</sub> = 20cm × 10cm, S<sub>2</sub> = 25cm × 15cm, S<sub>3</sub> = 30cm × 20cm

**Figura 4-4.:** Efecto de la precisión en la densidad de siembra [Kabir, 2013].

La figura 4-4, muestra un estudio realizado en el año 2013 para determinar el efecto de las densidades de siembra en el tiempo de crecimiento y rendimiento de la zanahoria, en este se observó una diferencia significativa entre los diferentes espacios de producción de zanahoria con respecto al diámetro y longitud de la raíz, en donde la siembra que presentaba mayor espaciamiento, obtuvo un mejor desarrollo de la misma. [Kabir, 2013].

#### 4.1.4. Cultivo de zanahoria

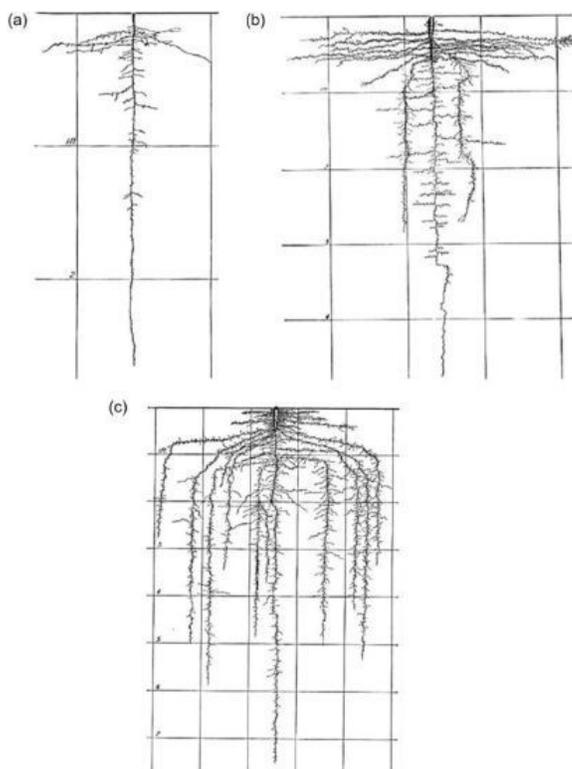
La zanahoria es una planta herbácea, que puede ser anual o bianual dependiendo del tiempo de desarrollo, en donde la primera presenta su fase vegetativa y reproductiva en un año y la segunda en un año la vegetativa y en otro la reproductiva. Las condiciones agroclimatológicas y en general los requerimientos de la zanahoria son un factor decisivo para la formación de la raíz, previniendo malformaciones y hombros verdes en el órgano de consumo debido a la exposición de la zanahoria al sol, por ejemplo [Gaviola, 2018] [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015]. Por ello, es necesario tener en cuenta los requerimientos del cultivo que se presentan en la tabla 4-4 para obtener un buen rendimiento en la producción:

**Tabla 4-4.:** *Requerimientos del cultivo de zanahoria [Pollock, 2003] [Gloria Helena González Blair, 2010] [(EDA) Entrenamiento y Desarrollo de Agricultores, 2007]*

<b>Requerimiento del cultivo</b>	<b>Descripción</b>
Temperatura	13 a 18°C, temperaturas inferiores o superiores pueden ocasionar pérdidas de color de las raíces.
pH	6-6.5
Densidad de siembra	En promedio 600.000 plantas por hectárea
Rendimiento	5.5 Kg/ha en promedio para la siembra convencional
Humedad relativa adecuada	70-80 %
Época de siembra	Se puede cultivar todo el año; se debe disponer de riego y contar con las condiciones adecuadas para el cultivo.
Suelo	Arcilloso-arenoso, ligeramente ácido, sueltos y profundos.
Temperatura mínima y máxima	5 y 35C respectivamente.
Demanda de agua	400 y 800 milímetros de lámina de agua en total durante el ciclo de cultivo.
Riego	El cultivo de zanahoria requiere de riego adecuado para obtener raíces de buena calidad, evitando baja productividad, formas y tamaños inadecuados, pudriciones y/o pérdida de nutrientes.
Control de arvenses	Realizar como mínimo dos deshierbes en el cultivo. Debe realizarse con mucho cuidado para no dañar las raíces superficiales de la planta.
Rotaciones	Va bien antes de: lechuga, repollo, acelga, habichuela, tomate, arveja o fríjol.
Cosecha	La cosecha se efectúa de cuatro a cinco meses después de la siembra, dependiendo del clima y la variedad. Pasado este tiempo la raíz engrosa y se vuelve amarga.

#### 4.1.4.1. Sistema radicular

En principio, la raíz principal es la que profundiza para posteriormente ampliar su sistema radicular con raicillas laterales finas encargadas de absorber agua y nutrientes, todo esto para engrosar la raíz principal u órgano de consumo (ver figura 4-5) [Gloria Helena González Blair, 2010] [Reina, 1997].



**Figura 4-5.:** Desarrollo del sistema radicular de la zanahoria. [Seminis, 2017]

Anatómicamente la raíz principal de la zanahoria está compuesta por el floema que corresponde a la parte externa del órgano y el xilema o corazón en la parte central, como se observa en la figura 4-6. El grosor deseado de la zanahoria se encuentra relacionado a la cantidad de floema. Al presentar menos xilema, esto implica que tiene un centro o corazón pequeño pero mayor capacidad de acumular azúcares y carotenos en la parte externa [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015] [(UNP) Universidad Nacional de la Plata, ].

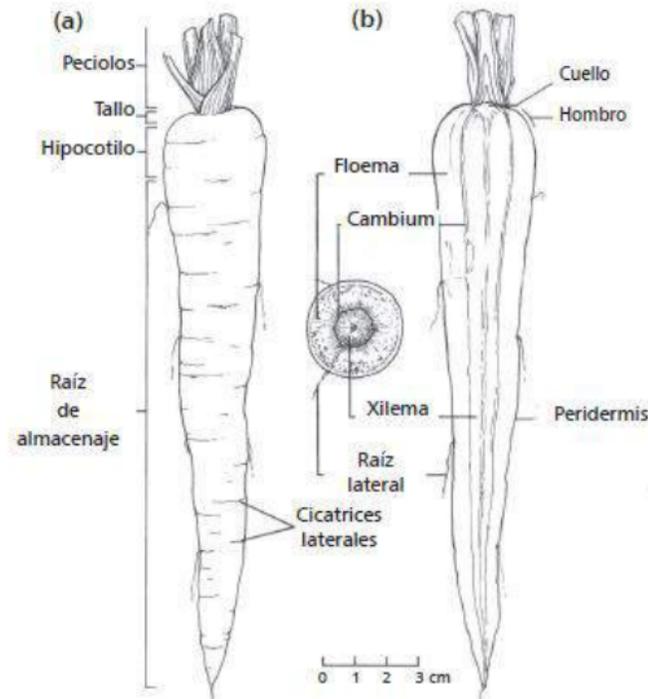


Figura 4-6.: Partes de la raíz de la zanahoria [CASTRO, 2014]

#### 4.1.4.2. Ciclo fenológico

El ciclo fenológico de la zanahoria consiste en 3 fases o etapas principalmente, la primera es la fase de desarrollo de raíces absorbentes y hojas, en el caso de las anuales, se presenta aproximadamente los primeros 55 días, la segunda consiste en el engrosamiento de las raíces que se da entre los días 55 a 120 de la siembra, en donde se realiza la cosecha [Tecnológico, 2017], y por último la fase reproductiva en donde la zanahoria es inducida a una fase de floración [García, 2014] [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015], como se muestra en la tabla 4-5:

**Tabla 4-5.:** Fases del ciclo fenológico de la zanahoria [García, 2014] [Rojas et al., 2011]

<b>FASE DEL CICLO FENOLÓGICO</b>	
<p>Fase I Vegetativa: Desarrollo de raíces absorbentes y hojas. En esta etapa, se genera el crecimiento en longitud de la raíz principal, representa el 80 % de la longitud total de la zanahoria.</p>	<p><b>Desarrollo de raíces absorbentes y hojas</b></p> 
<p>Fase II Vegetativa: Engrosamiento de la raíz, por medio de la acumulación de carbohidratos, la cual no se detiene mientras permanezcan las hojas.</p>	<p><b>Engrosamiento de la raíz</b></p> 
<p>Fase III Reproductiva: Floración, fructificación y maduración de las semillas. Se induce cuando hay una acumulación de frío menor a 10°C.</p>	<p><b>Floración</b></p> 

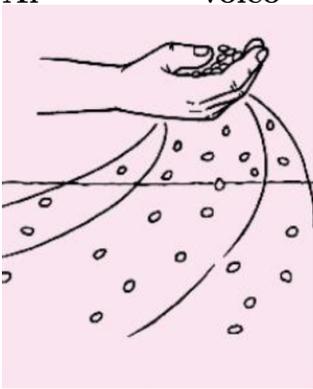
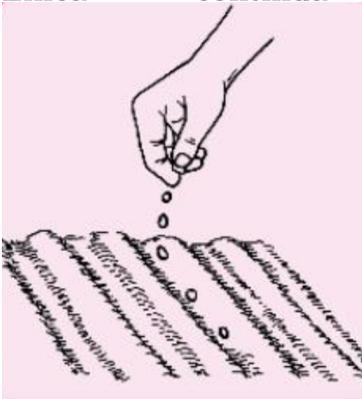
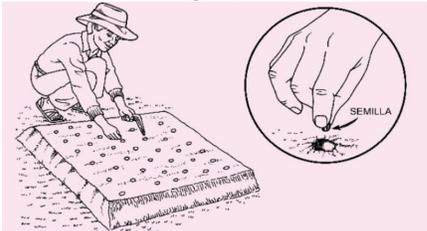
#### **4.1.4.3. Sistemas de siembra**

La siembra de zanahoria se hace en forma directa o indirecta, la primera se realiza distribuyendo la semilla directamente en el suelo y la segunda, utilizando almácigos para un posterior trasplante, ambas generalmente a mano [(ICA) Instituto Colombiano Agropecuario, 2002] [Anasac, 2011]. La disposición de la semilla o la plántula en el suelo puede realizarse de dos maneras:

- **EN HILERAS:** Este es un sistema adaptado para áreas planas, hace referencia a la siembra en filas con distancias establecidas [Instituto Colombiano Agropecuario, 1977].
  
- **EN ERAS:** En este sistema se emplean ERAS levantadas sobre la superficie del suelo, lo que permite controlar mejor la calidad del suelo, mejorar el desarrollo de las raíces ya que se siembra en un terreno más suelto y se aumenta la densidad de población se construyen comúnmente de 1 a 1,20 de ancho, es el sistema más utilizado en Colombia [Instituto Colombiano Agropecuario, 1977].

La preparación del terreno se realiza utilizando azadón y herramientas comunes, sin el uso de tecnificación. En pocas regiones, la preparación se realiza utilizando tractor o bueyes [BAZÁN, 2007]. Existen tres formas o tipos principales para realizar la siembra de zanahoria como se muestra en la tabla 4-6

**Tabla 4-6.:** *Tipos de siembra [DIACONIA, 2017] [Instituto Colombiano Agropecuario, 1977] [Pollock, 2003]*

TIPOS DE SIEMBRA	DESCRIPCIÓN
<p><b>Al voleo</b></p> 	<p>La siembra al voleo consiste en tomar un puñado de semillas y distribuirla manualmente abriendo los dedos o con el empleo de una sembradora manual, la cual consta de un plato giratorio y una manivela que hace mover dicho plato. La siembra al voleo da un mejor control de malezas, pero a su vez causa desuniformidad en las raíces.</p>
<p><b>Línea continua</b></p> 	<p>En este sistema se distribuyen las semillas de manera continua, ayudado con los dedos índice y pulgar, distribuyendo la semilla sobre líneas transversales al terreno.</p>
<p><b>A golpes</b></p> 	<p>En esta técnica se trata de depositar una o dos semillas en hoyos adecuadamente distanciados. Es un método que mantiene distancias y cantidad de semilla, sin embargo, requiere de mayor trabajo si se realiza manualmente.</p>

Tradicionalmente en Cundinamarca y Nariño, la zanahoria se siembra al voleo sobre una

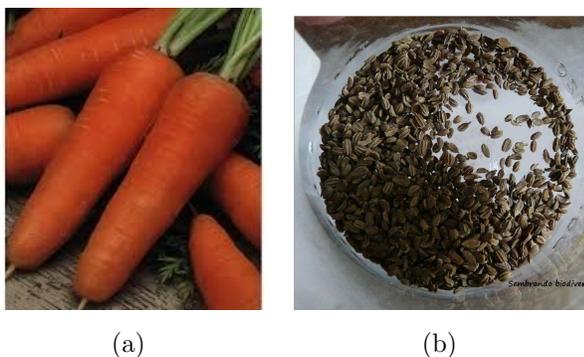
ERA, por su parte, en el Oriente Antioqueño se siembra transversalmente a la era, en surcos de 20 cm uno de otro. En general, la siembra al voleo, es el tipo tradicionalmente utilizado en Colombia, en donde se utiliza aproximadamente 4,5 - 6 kg/ha, frente a la siembra técnica que puede llegar a utilizar entre e 2,5 a 3 kg/ha [Instituto Colombiano Agropecuario, 1977] [Anasac, 2011].

#### 4.1.4.4. Terreno de cultivo

El terreno debe estar mullido hasta una profundidad de 25 a 30 cm pero no se debe pulverizar ya que esto promueve la generación de costras en la superficie y pérdida de la aireación del suelo. Después de mullir el terreno se realiza la nivelación y el surcado. Para realizar la siembra se requieren ERAS altas de por lo menos 40 a 90 cm de ancho, separadas entre sí de 40 a 45 cm y trazadas con curvas de nivel para evacuar los excesos de agua en temporada de lluvias. Así se promueve la aireación y buen drenaje, alcanzando un crecimiento adecuado de la zanahoria y facilitando la aplicación de riego y demás labores del cultivo. En Colombia los medianos productores siembran entre 6-8 hectáreas [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015], [DANE, 2017].

#### 4.1.4.5. Características de la zanahoria Chantenay

La zanahoria Chantenay tiene una forma alargada con punta redonda, tiene un peso de 170-190 g, con un color naranja intenso y sus raíces tienen una longitud de 5-50cm y un diámetro de 1-10 cm (ver figura 4-7a). El tamaño de las semillas es de aproximadamente 2 mm y tiene un peso de aproximadamente 0,001g (ver figura 4-7b) [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015] [Arroyave, 2013] [MARTÍNEZ, 2016].



**Figura 4-7.:** Zanahoria Chantenay y su respectiva semilla [zonAgricola, 2014] [Sembrando biodiversidad, 2010].

### 4.1.5. Robot móvil

Por otro lado, el siguiente componente a tener en cuenta es el componente ingenieril, que corresponde al prototipo (robot móvil) que garantiza las condiciones en términos de densidad de siembra que permiten que la zanahoria tenga el desarrollo esperado. Dicho componente es más una herramienta de apoyo para los cultivadores, cuyo proceso de construcción debe tener en cuenta lineamientos o características tales como el tipo de locomoción, forma de la base del cuerpo, el sistema sensorial que servirá de apoyo para el control de alto y bajo nivel del robot móvil, todo esto para definir un diseño.

#### 4.1.5.1. Tipos de locomoción

El sistema de locomoción es una de las características de un robot que está condicionada por su entorno, ya que éste establecerá algunas condiciones que deba cumplir el robot para un desplazamiento fluido. Existen 3 principales tipos de locomociones empleados:

- Patas: Estas permiten el desplazamiento en superficies desiguales y además sobrepasan obstáculos a cierta altura. Sin embargo, su consumo energético es mayor en comparación con los otros tipos de locomoción, en general requieren grados de libertad mayores y un control más complejo, (ver figura 4-8) [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] [Caicedo, 2015].



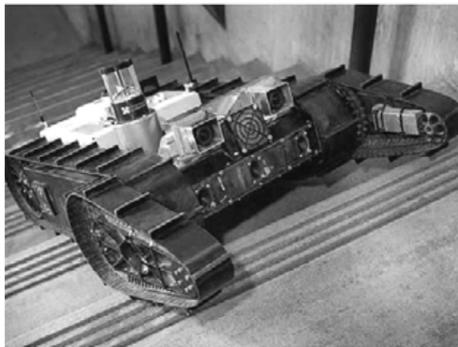
**Figura 4-8.:** Robot con locomoción por medio de patas [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Ruedas: Es el tipo de locomoción más empleado debido a su eficiencia sobre terrenos irregulares, permite desplazarse a grandes velocidades. Entre sus desventajas se encuentra que no puede sobrepasar obstáculos mayores que el propio radio de la rueda, (ver figura 4-9) [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] [Caicedo, 2015].



**Figura 4-9.:** Robot con locomoción por medio de Ruedas [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Oruga: Este mecanismo confiere una mayor maniobrabilidad en terrenos blandos y son menos susceptibles que las ruedas de sufrir daños por el entorno, como piedras o arena. Sin embargo, al tener mayor área de contacto con el suelo, tiene mayor probabilidad de derrapar, por lo que no presenta precisión al requerir una posición deseada debido a la fricción del suelo, por ende el cálculo muerto también es impreciso (a diferencia de las ruedas que sus relieves en la banda de rodadura permiten una baja presión) y además su rigidez le impide moverse y girar en espacios cortos, requiriendo mayor área para hacerlo y mayor potencia para su desplazamiento, (ver figura 4-10) [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] [Caicedo, 2015].

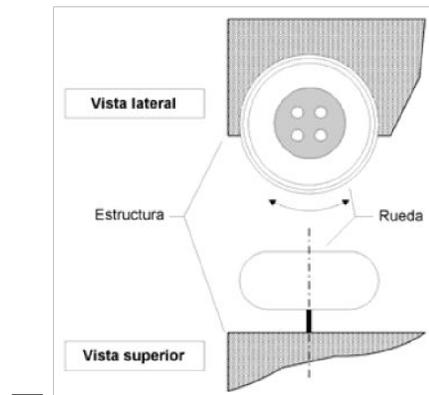


**Figura 4-10.:** Robot con locomoción por medio de oruga [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

Existen diferentes tipos de ruedas:

- Rueda fija

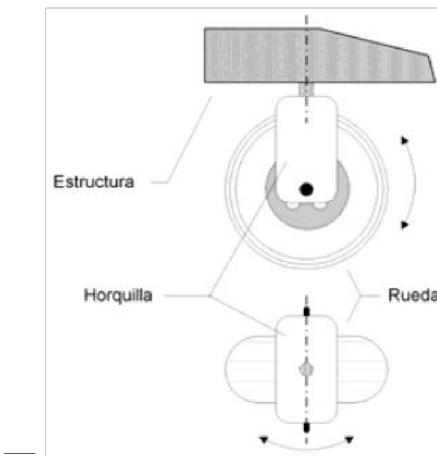
El eje de esta rueda está fijo a la estructura del robot, (ver figura 4-11) [Caicedo, 2015] [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008].



**Figura 4-11.:** Rueda tipo fija [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Rueda orientable centrada

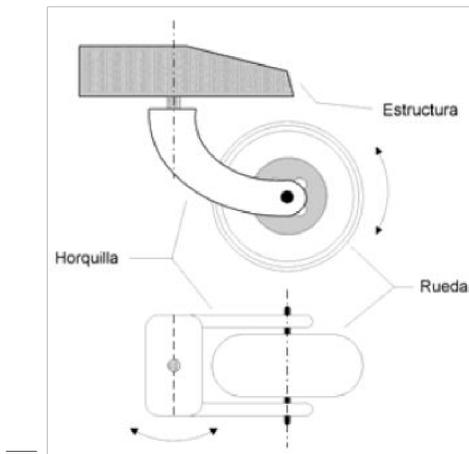
En ella el movimiento del plano de la rueda con respecto a la estructura es una rotación alrededor de un eje vertical que pasa a través del centro de la rueda, y por ello se suele emplear para cumplir funciones como rueda de dirección o como rueda de tracción-dirección, (ver figura 4-12) [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] [Caicedo, 2015].



**Figura 4-12.:** Rueda tipo orientable centrada [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Rueda orientable no-centrada

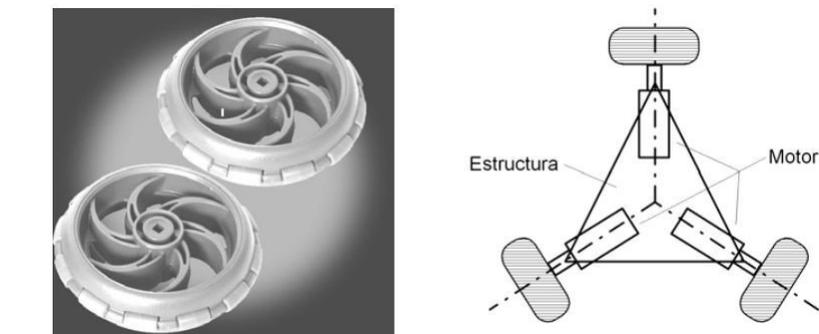
Es una rueda orientable con respecto a la estructura principal, tal que la rotación del plano de la rueda es alrededor de un eje vertical el cual no pasa a través del centro de la rueda, y su función principal es dar estabilidad a la estructura mecánica del robot como rueda de dirección, (ver figura 4-13) [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] [Caicedo, 2015].



**Figura 4-13.:** Rueda tipo orientable centrada [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

#### - Rueda sueca (swedish wheel)

En este tipo de ruedas solo una componente de la velocidad del punto de contacto de la rueda con el terreno se supone igual a cero a lo largo del movimiento. Esto le permite, gracias a los rodamientos montados en la superficie de la rueda, desplazarse en dirección perpendicular al plano de la rueda, (ver figura 4-14) [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] [Caicedo, 2015].



**Figura 4-14.:** Rueda tipo sueca [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

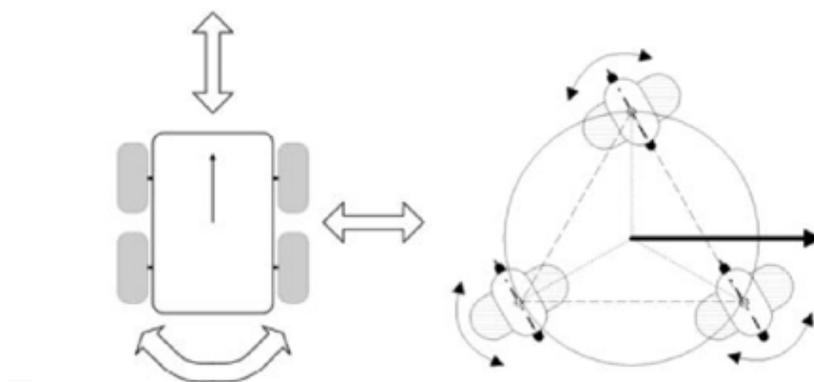
#### 4.1.5.2. Configuraciones de robot móvil

Por otro lado, para definir configuración de las ruedas del robot , es importante reconocer sus restricciones, ya que de ello depende su forma de movimiento. Las restricciones holonómicas, por ejemplo, son aquellas que integran las variables de posición, tanto traslacionales como rotacionales, hacen que el sistema sea integrable sin involucrar ninguna variable de velocidad. Si el sistema de restricciones de velocidad no es integrable, se dice que las restricciones son

no holonómicas. Específicamente, cuando un robot móvil tiene restricciones no holonómicas, este puede moverse hacia adelante o atrás, pero no de manera lateral debido a la forma de deslizamiento de las ruedas. [Dr. Abelardo del Pozo Quintero, 2012] Entre algunas de estas disposiciones se encuentran la omnidireccional, unicyclo, triciclo y dirección Ackerman:

- Robot omnidireccional

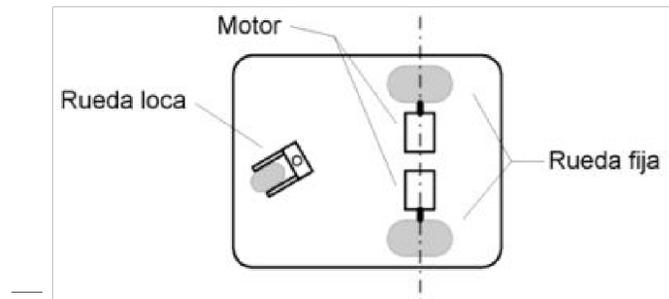
Tienen máxima maniobrabilidad; esto significa que pueden moverse en cualquier dirección sin necesidad de reorientarse. Es por ello que tiene características holonómicas, las cuales le confieren dichos grados de libertad en su movimiento como se puede observar en la (figura 4-15) [Cánovas, 2011].



**Figura 4-15.:** Robot omnidireccional con ruedas sueltas y con ruedas orientables centradas [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Unicyclo

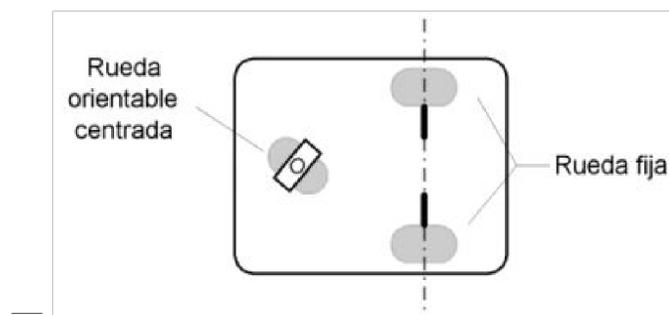
Es una estructura que consta de dos ruedas fijas sobre el mismo eje, controladas de manera independiente y una rueda orientable no-centrada que le confiere estabilidad. Su control se da mediante velocidades de avance lineal y rotacional. Al variar correctamente estos valores, el robot se puede mover desde un punto donde está estacionado hasta cualquier otro punto en el plano XY. Esta organización le permite moverse sobre su propio eje, sin embargo, no es capaz de moverse en el sentido del eje de las ruedas de tracción, por ende tiene una restricción no holonómica, como se puede observar en la figura 4-16 [Cánovas, 2011].



**Figura 4-16.:** Estructura de un robot unicycle [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Triciclo

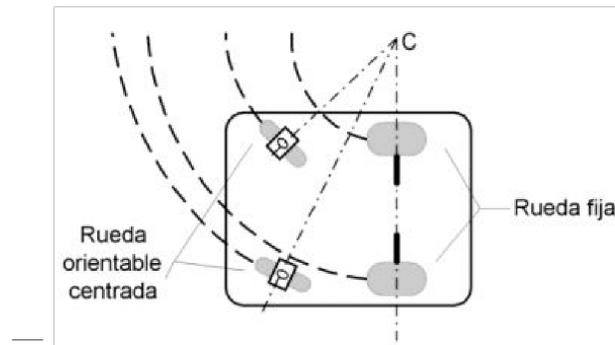
Está conformado por dos ruedas convencionales fijas sobre un mismo eje y una rueda centrada orientable que concentra las funciones de tracción-dirección. Tiene características no holonómicas y adicional a esto, presenta pérdida de tracción debido a que el equilibrio se acerca a los límites de la base durante en movimiento (ver figura 4-17) [Cánovas, 2011].



**Figura 4-17.:** Estructura de un robot triciclo [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

- Dirección Ackerman

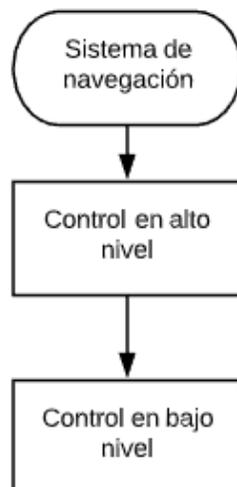
Como se observa en la figura 4-18 los ejes de las ruedas delanteras se interceptan en un punto C que pertenece al eje común de las ruedas traseras. El lugar de los puntos en el plano trazados por cada rueda, alrededor de este punto C, es un conjunto de arcos concéntricos donde todos los vectores velocidad instantánea son tangentes a estos arcos. Por ello, esta estructura, además de brindar mayor estabilidad, evita el deslizamiento en la ruedas y por lo tanto reduce los errores de odometría (estimación de la posición de vehículos con ruedas durante la navegación). [Cánovas, 2011]



**Figura 4-18.:** Sistema de dirección Ackerman [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008]

#### 4.1.6. Sistema de navegación

El sistema de navegación está compuesto por un sistema de control de alto nivel que se encarga de la movilidad del robot en el entorno, dentro de éste se encuentra la adquisición de datos de los sensores que brindan información del medio, como por ejemplo el giroscopio para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio o el encóder para codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos; para que a partir de dicha información se generen salidas de control al sistema en bajo nivel, el cual se encarga de traducir dichas salidas de control en señales análogas o digitales que permitan controlar los actuadores, (Ver diagrama de sistema de navegación en la figura 4-19) [Blanco Abia, 2014] [Somolinos, 2002].



**Figura 4-19.:** Sistema de navegación

#### 4.1.6.1. IMU (Unidad de medida Inercial)

Una unidad de medición inercial, IMU por sus siglas en inglés, es un tipo de sensor específico que permite medir la velocidad angular, la fuerza y, en algunos casos, el campo magnético. Se compone de un acelerómetro y un giroscopio, ambos de 3 ejes, que en conjunto forman una IMU de 6 ejes. También pueden incluir un magnetómetro adicional de 3 ejes, dando como resultado una IMU de 9 ejes como se puede observar en la figura 4-20. “Técnicamente, el término “IMU” hace referencia únicamente al sensor, pero usualmente las IMU se combinan con un software de fusión de sensores que combina datos de los múltiples sensores para proporcionar medidas de orientación y rumbo [Systems, 2013], [CEVA, 2013].

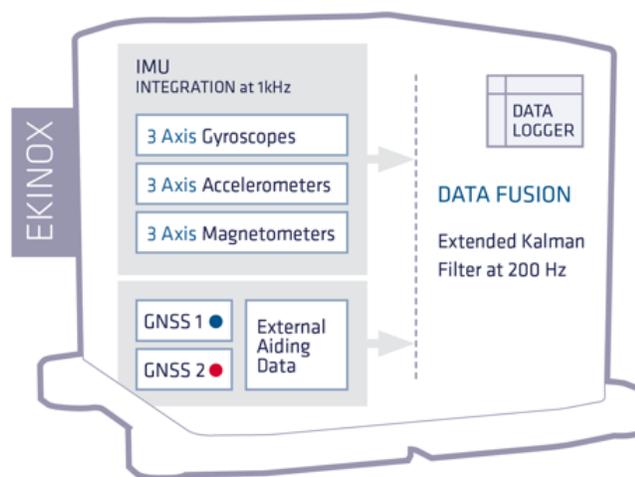


Figura 4-20.: Configuración interna IMU [CEVA, 2013]

Una IMU proporciona de 2 a 6 grados de libertad, que hace referencia a la cantidad de formas diferentes en que un objeto puede moverse en el espacio 3D. El máximo posible es 6, que incluyen 3 grados de movimiento de traslación a través de un plano recto a lo largo de cada eje (adelante / atrás, derecha / izquierda, arriba / abajo) y 3 grados de movimiento rotacional a través de x, y y eje z (ver figura 4-21). Por lo cual, una IMU puede proporcionar información sobre el entorno que la rodea para finalmente poder llevar a cabo la navegación del robot móvil [Systems, 2013], [CEVA, 2013].

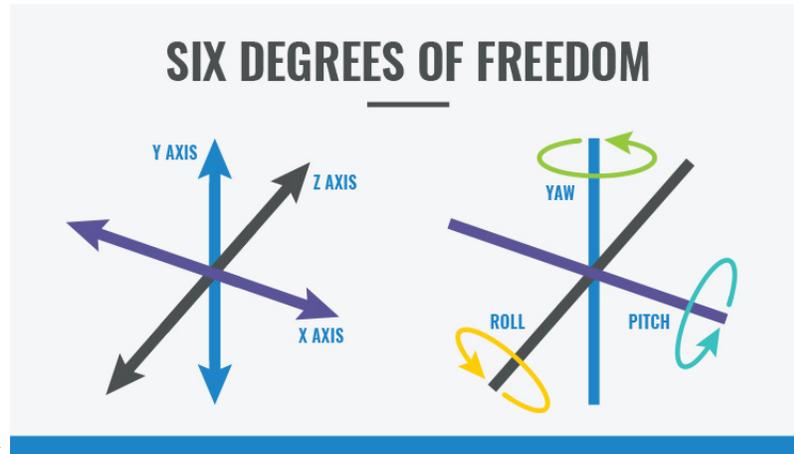


Figura 4-21.: Toma de datos grados de libertad IMU [Systems, 2013]

#### 4.1.6.2. Sensores de velocidad

Un encoder es dispositivo que sensa la velocidad y se encuentra ubicado en el eje giratorio que permite convertir el desplazamiento lineal o rotativo en señales digitales o de pulso. El más utilizado es el óptico, el cual consiste de un disco giratorio, una fuente de luz y un sensor de luz (fotodetector). El disco, que se encuentra en el eje, tiene patrones de sectores transparentes y opacos (figura 4-22); a medida que éste gira, dichos patrones interrumpen la luz emitida hacia el fotodetector lo que genera la salida digital o de pulso [Control, 2011], [Dynapar, 2010].

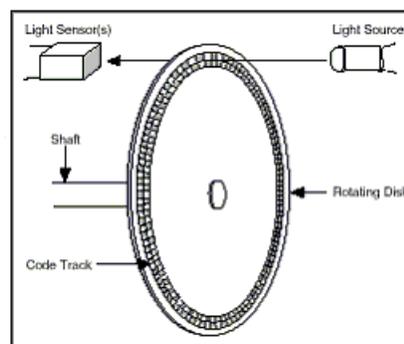
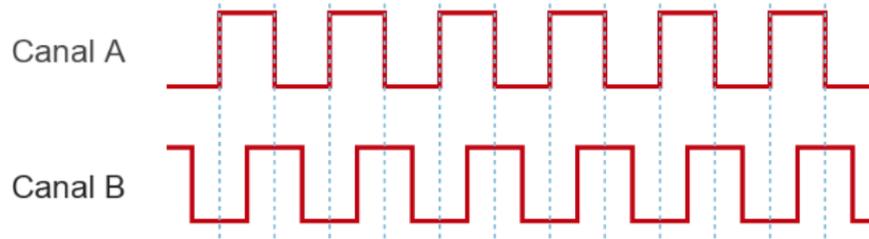


Figura 4-22.: Configuración del encoder [Control, 2011]

Para determinar la dirección, los de doble canal utilizan dos detectores y dos pistas de código (patrones del disco), cuyas señales de salida están desfasadas  $90^\circ$  (figura 4-23), las cuales indican tanto la posición como la dirección de rotación. Si el canal A conduce al B, por ejemplo, el disco está girando en sentido horario. Si por el contrario el canal B conduce al A, entonces el disco está girando en sentido antihorario. Por lo tanto, al monitorear tanto el número de pulsos como la fase relativa de las señales A y B, puede proporcionar la posición

y la dirección de rotación [Control, 2011], [Dynapar, 2010].



**Figura 4-23.:** Fases A y B del encoder [Dynapar, 2010]

#### 4.1.6.3. Sistema de control

Se puede entender como el cerebro del robot, es el encargado del procesamiento de la información suministrada por los sensores y de esta determinar los movimientos precisos de cada parte del mecanismo para que el elemento terminal pueda ser movido a la posición y orientación requeridas en el espacio [Intef, 2012]. Algunos de los tipos de control que se tienen en cuenta para la realización del presente trabajo son:

- Control P: La función de transferencia entre la salida del  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ , (ver en la ecuación 4-1):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \quad (4-1)$$

Ecuación 4-1 Control proporcional

Donde  $Kp$  se denomina ganancia proporcional, cuya acción es la denominada banda proporcional que expresa que tan grande será la acción de control ante una señal de error en la entrada [Universidad Don Bosco, 2013][Universidad de Buenos Aires, 2003].

- Control PI: El valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error, por lo que en este tipo de control la acción varía en función de la desviación de la salida y del tiempo en el que se mantiene esta desviación, (ver en la ecuación 4-2).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Ki * \left(1 + \frac{1}{Tn * s}\right) \quad (4-2)$$

#### Ecuación 4-2 Control proporcional integral

Donde  $K_i$  es la ganancia proporcional y  $T_n$  se denomina tiempo de acción integral (ambos valores son ajustables). La velocidad de respuesta del sistema de control dependerá del valor de  $K_i$  que es la pendiente de la rampa de acción integral [Universidad Don Bosco, 2013] [Universidad de Buenos Aires, 2003].

- Control PD: Este controlador se opone a desviaciones de la señal de entrada, con una respuesta que es proporcional a la rapidez con que se producen éstas, (ver en la ecuación 4-3).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d * (1 + T_v * s) \quad (4-3)$$

#### Ecuación 4-3 Control proporcional derivativo

Donde  $T_v$  se denomina duración predicha. La acción de la derivada es “predecir” los errores que se puedan tener, es decir, adelanta la acción de control frente a la aparición de una tendencia de error (derivada) [Universidad Don Bosco, 2013] [Universidad de Buenos Aires, 2003].

- Control PID: Es la unión de los dos controladores anteriores (PD y PI), (ver en la ecuación 4-4):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_n * s} + T_v * s\right) \quad (4-4)$$

#### Ecuación 4-4 Control proporcional integral derivativo

En él se utilizan las acciones de “predicción” del PD y de “acumulación” del PI, permitiendo un mejor rechazo a los errores (sobresoscilaciones) [Universidad Don Bosco, 2013] [Universidad de Buenos Aires, 2003].

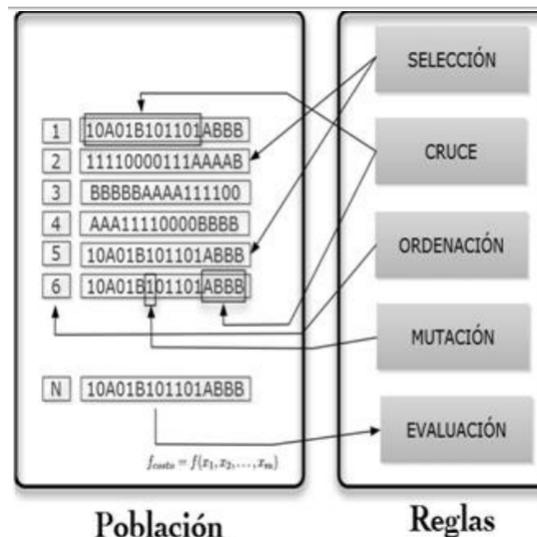
#### 4.1.6.4. Técnica de sintonización Algoritmo genético para PID

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos, siendo capaces de solucionar problemas del mundo real a partir de una analogía directa con un comportamiento similar al de los cromosomas. En este algoritmo, cada uno

de los cromosomas tendrá asociado un ajuste, valor de bondad o fitness, que cuantifica su validez como solución al problema y dependiendo de dicho valor, podrá reproducirse más o menos veces, es decir, el individuo que mejor se adapte, es el que tiene mayores posibilidades de transferir su información [Colorado Arellano Othon, 2018] [Arranz de la Peña, 2005]. Está constituido por la población y el siguiente conjunto de reglas:

- **Función objetivo:** proporciona una medida de desempeño del sistema asociado a cierto individuo en la población [Colorado Arellano Othon, 2018] [Arranz de la Peña, 2005].
- **Operador de selección:** busca a los individuos que darán origen a las futuras generaciones. Por lo general, la selección depende del valor de la función de evaluación de cada individuo [Colorado Arellano Othon, 2018] [Arranz de la Peña, 2005].
- **Operador de cruce:** consiste en mezclar la información genética de dos individuos para generar nuevos individuos [Colorado Arellano Othon, 2018] [Arranz de la Peña, 2005].
- **Operador de mutación:** consiste en alterar las características genéticas de un individuo, para aumentar la probabilidad de exploración del espacio de búsqueda y disminuir el riesgo de estancamiento del algoritmo [Colorado Arellano Othon, 2018] [Arranz de la Peña, 2005].

Cuentan con elementos tales como operadores genéticos, que hacen referencia a los diferentes que se pueden ejercer sobre una población para obtener poblaciones nuevas; la población, que se refiere al conjunto de cromosomas, obteniendo de forma sucesiva diversas poblaciones; individuo que se caracteriza su propia especie pues es el cromosoma, que tiene el código de información sobre el que opera el algoritmo, como lo muestra la (figura 4-24). [Colorado Arellano Othon, 2018] [Arranz de la Peña, 2005]



**Figura 4-24.:** Componentes de un algoritmo genético [Colorado Arellano Othon, 2018].

#### 4.1.6.5. Integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (IAET)

Es una integral cuya aplicación principal consiste en suprimir errores que persistan mucho tiempo. Al tener la variable del tiempo como un factor del error, le da un mayor peso a los errores que ocurren cuando  $t$  tiende a valores más grandes (figura 4-25) . ITAE amplifica los errores encontrados en los tiempo más largos y se puede utilizar este parámetro de desempeño para determinar cual sintonización tiene menos desviaciones del setpoint después de estabilizada la planta en consideración como se muestra en la (ecuación 4-5) [Fierro, a] [JOHANDER MORA GONZALEZ, 2007].

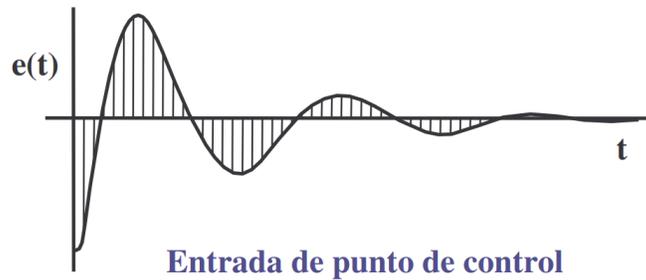


Figura 4-25.: Entrada de punto de control [Fierro, b]

$$IAET = \int_0^{\infty} t |\varepsilon(t)| dt \quad (4-5)$$

Ecuación 4-5 IAET [Fierro, b]

#### 4.1.6.6. Estimación del error cinemático (KTE)

El KTE compara el camino recorrido hasta la ruta predeterminada para evaluar y estimar la distribución del error [Natalia del Pilar Silva Suárez, 2019]. Evalúa la suavidad, el tiempo de respuesta y el tiempo de ejecución de un algoritmo de seguimiento [Juan A. Gallego and Pons, 2010]. Se expresa matemáticamente con la (ecuación 4-6):

$$KTE = \sqrt{|\bar{\varepsilon}|^2 + \sigma^2} \quad (4-6)$$

Ecuación 4-6 kTE [Jiménez, 2018]

Donde  $|\bar{\epsilon}|^2$  es el cuadrado medio de los errores entre la ruta predeterminada y la ruta seguida por el robot, y  $\sigma^2$  es la varianza de estos datos, la cual es proporcional al error [Jiménez, 2018] De esta forma se puede obtener un valor objetivo del seguimiento de camino.

#### 4.1.6.7. ROS

Por sus siglas en inglés, Robot Operating System, es una plataforma que permite programar sistemas robóticos, proporcionando servicios y librerías como visión artificial o algoritmos para la navegación, que facilitan la creación de aplicaciones para robots. Las funcionalidades que ofrece van desde la abstracción de hardware de bajo nivel para control de dispositivos, hasta el paso de mensajes entre procesos. En esta plataforma es posible usar diferentes lenguajes de programación para desarrollar como Python, C++ y Lisp, entre otros. Puede ser ejecutado en máquinas tipo Unix, Ubuntu y Mac OS X. [Alvaro García Cazorla, 2013] A nivel gráfico, la red ROS se encarga de procesar datos, dentro del proceso, existen cuatro conceptos que brindan dichos datos de distinta manera:

- **Nodo:** Son procesos que llevan a cabo cálculos, en general, el control de un robot comprenderá muchos nodos, en donde cada uno contiene el control de cada sección del mismo, por ejemplo de las ruedas otro de localización o planeación de ruta. [Alvaro García Cazorla, 2013]
- **Maestro:** El maestro proporciona registro de nombres y la búsqueda para la el resto de la computación gráfica, se encarga de que los nodos encuentren e intercambien mensajes o información entre sí. [Alvaro García Cazorla, 2013]
- **Mensajes:** Los nodos se comunican a través de mensajes (Topics), estos contienen información estructurada de datos, incluyendo estructuras anidadas y matrices. [Alvaro García Cazorla, 2013]
- **Temas:** Los mensajes se enrutan a través de un sistema de transporte de publicación/suscripción semántica. Un nodo envía un mensaje por publicar a un determinado tema. El tema es un nombre que se utiliza para identificar el contenido del mensaje. Un nodo que está interesado en un determinado tipo de datos se suscribe al tema correspondiente. [Alvaro García Cazorla, 2013]

## 4.2. Antecedentes

La automatización agrícola es un tema que se encuentra en auge y que facilita labores específicas antes, durante y después del proceso de producción, por medio de diferentes métodos, uno de éstos son los sistemas mecanizados como, por ejemplo, las sembradoras neumáticas, cintas alveoladas, cangilones, los cuales consisten principalmente en tractores o dispositivos que por factores como precio, peso y emisiones de gases no son las más adecuadas de implementar

(FAO, 2013). Por ello, a continuación se presentan trabajos que de manera automatizada permiten realizar acciones relacionadas a la siembra y sus ventajas.

Un primer trabajo es realizado en el 2015 en India [Gulam Amer, 2015] donde se desarrolla un agribot hexápodo controlado por medio de conexión wifi, que realiza las acciones de perforación, deposición de semilla y aplicación de fertilizante. La perforación es realizada por un motor DC que está unido a una punta en forma de pala (la profundidad está asociada al manejo del robot, específicamente sus articulaciones). Para depositar una sola semilla desarrollaron un mecanismo que consistió en la apertura de una compuerta (servomotor) cuando la semilla se encontraba en posición vertical a la salida del tanque de almacenamiento. Los resultados obtenidos mostraron que el mecanismo para la deposición de este trabajo estaba relacionado con el presente proyecto ya que dentro de las propuestas se encuentra la deposición de la semilla, por lo cual es necesario tener una base o guía de un método de alta precisión que pueda ser implementado. [Gulam Amer, 2015]

En el 2016 en India [Saurabh Umalkar, 2016], se desarrolla un robot teleoperado a través de una aplicación android y un módulo wifi para Arduino, adicionalmente utilizan un panel solar como fuente de energía eléctrica. Este dispositivo realiza el posicionamiento de la semilla con la ayuda de un embudo. La aplicación permite realizar las acciones de avanzar, parar y sembrar; esta última consiste en una compuerta que se abre y deja caer la semilla. Los resultados obtenidos muestran que con la implementación del robot hay más exactitud en las distancias de plantación (semilla de soya, semilla de maní). Teniendo en cuenta que el presente proyecto propone un robot móvil, la teleoperación puede ser una de las formas de control de sus movimientos. Ya sea para disponer la semilla siendo preciso colocando una semilla o dos como máximo; por último, la implementación del robot generó mayor precisión en las distancias y profundidades de plantación (semilla de soya, semilla de maní).

Por último, el trabajo realizado en 2017 por Palepu V. Santhi et al. desarrollan un agribot autónomo para sembrar semillas, cuya navegación o movimiento se basa en la visión por cámara. Se utilizan sensores ultrasónicos para detectar los obstáculos y para medir el nivel del suelo mientras se realiza el mecanismo de siembra de semillas, también se utilizan sensores IR para medir las semillas. Para la siembra se emplea un mecanismo de tornillo de avance cuyo control de profundidad es en bucle cerrado, con la ayuda del sensor ultrasónico se mide la distancia al suelo determinando la profundidad. El tornillo de avance se mueve utilizando un servomotor en el sentido horario para hacer una provisión para la siembra de la semilla, después cuando la semilla cae es observada por el sensor infrarrojo (IR) y el tornillo de avance se mueve en sentido antihorario para volver a la posición inicial. La navegación del robot se realiza por medio de procesamiento de imagen, donde va realizando tomas del terreno y así poderse mover. Los resultados mostraron un buen desempeño del mecanismo de sembrado y de la navegación del robot. Ya que dentro de las propuestas del presente

proyecto está la excavación y deposición de la semilla el anterior trabajo se relaciona ya que utilizan un mecanismo bastante preciso y sencillo de implementar. [Palepu V. Santhi, Nellore Kapileswar, Vijay K. R. Chenchela y Venkata Siva Prasad, 2017]

## 5. Metodología

La metodología de este proyecto se dividió en las siguientes tres etapas, las cuales corresponden a cada objetivo específico planteado inicialmente: diseño, implementación y evaluación del prototipo sembrador; cada uno de estos ítems contiene diferentes actividades que permitieron llevar a cabo en su totalidad el cumplimiento de dichos objetivos. Para mayor comprensión se realizó un diagrama de flujo que contiene los pasos o actividades correspondientes de manera organizada para los 3 objetivos específicos, ver figuras **5-1**, **5-5** y **5-17** respectivamente.

En términos generales, la etapa de diseño comprende lo relacionado a escoger las diversas características que harán que el prototipo logre sembrar correctamente teniendo en cuenta distancias de plantación, profundidad y la precisión con que se recorre el camino o los surcos de siembra, para este último se ejecutó un método de control de bajo y alto nivel. La siguiente etapa desarrollada fue la implementación, en donde se llevó a cabo lo propuesto en el diseño final, allí se realizó la construcción del prototipo y se ensambló cada uno de los elementos planteados, electrónicos y mecánicos. Por último, para probar la efectividad del prototipo, se realizó un espacio de prueba que permitiera evidenciar las distancias y profundidad de siembra, la cantidad de semilla dispuesta y en general el desempeño del prototipo durante el recorrido.

## 5.1. Primera etapa: Diseño del prototipo sembrador

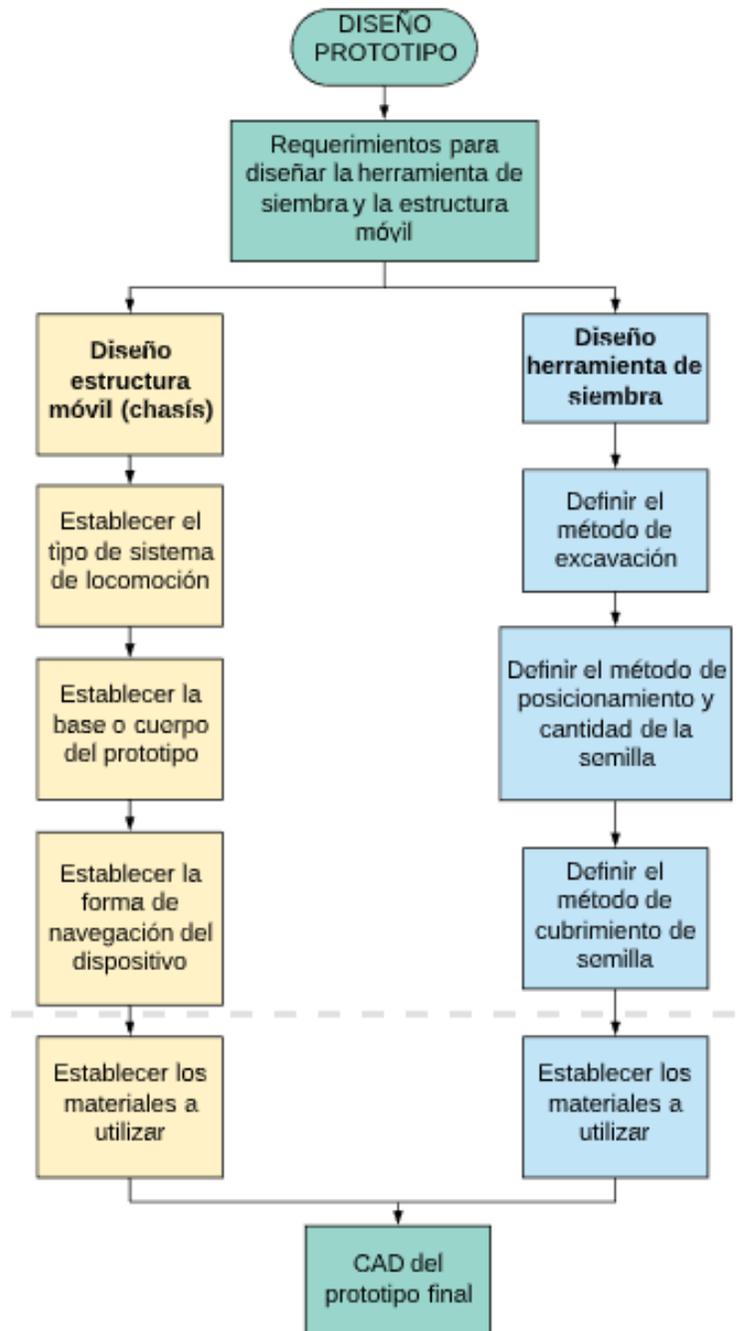


Figura 5-1.: Diagrama de flujo actividades para definir el diseño

Como se puede observar en la figura 5-1, se idearon las actividades a realizar dividiendo el diseño en sistema de siembra, que se refiere específicamente al sistema que incluye las semillas y su deposición, y en el robot móvil. En esta etapa se realizó el levantamiento de

requerimientos para definir las características tanto del robot como de de la herramienta de siembra, entre las características del chasis, se encuentra su forma de locomoción, la forma de la base del cuerpo, el sistema de navegación y los materiales a utilizar. Por otro lado, para el sistema de siembra se define el método de excavación, de posicionamiento y cantidad de semilla a disponer, también la forma en que se cubriría la misma y los materiales a utilizar.

### 5.1.1. Entrevista a cultivadores

La entrevista a los cultivadores fue considerada un punto de partida fundamental para construir los requerimientos, principalmente porque al indagar más a fondo en un espacio real de mediano cultivador es posible adquirir información adicional a la encontrada en la literatura como características propias del terreno, cantidad real de semilla sembrada en relación con la semilla que germina, la calidad de la raíz principal, y tener idea de cómo siembra un cultivador actualmente, entre otras revelaciones que nos ayudaron a seleccionar los requerimientos para el funcionamiento, la operación y la calidad requerida por el prototipo. Esta encuesta se realizó a 3 cultivadores de mediana producción.

- P1. ¿Cómo es el terreno de siembra? (características)
- P2. ¿Cuánto terreno siembra?
- P3. ¿Cuánta semilla siembra regularmente?
- P4. ¿Qué tipo de semilla siembra?
- P5. ¿Cuál técnica usa para sembrar?
- P6. ¿Utiliza alguna herramienta que le permita realizar la siembra con mayor precisión?
- P7. ¿Cuánto demora sembrando?, ¿Cuántas personas están involucradas?
- P8. ¿Qué porcentaje de germinación tiene al realizar la siembra a su modo?
- P9. ¿Posee problemas con el producto final?
- P10. ¿Ha utilizado o sabe de herramientas de siembra para el cultivo de zanahoria?
- P11. ¿Considera pertinente la realización del proyecto?
- P12. ¿Qué considera indispensable tener en cuenta en el desarrollo del prototipo?

La entrevista fue realizada a tres personas, todos medianos productores, dos permitieron una visita a sus fincas y de igual forma se apoyan en la información encontrada en la literatura.

- Ploriberto Cubillos, finca ubicada vía la Mesa/ entrevista
- José Figueroa, finca ubicada Lucitania, Toca-Boyacá /entrevista y visita
- Juan Camilo Ruíz, finca ubicada Tunja-Boyacá / entrevista y visita

**Tabla 5-1.:** *Respuestas a la entrevista realizada a los tres cultivadores*

	<b>Ploriberto Cubillos</b>	<b>José Figueroa</b>	<b>Juan Camilo Ruíz</b>
P1	Medianamente húmedo, bastante grumoso e irregular	Medianamente húmedo, bastante grumoso e irregular y empinado	Medianamente húmedo, bastante grumoso e irregular y empinado
P2	3-5 hectáreas	4-8 hectáreas	5-8 hectáreas
P3	2-4 paquetes	3-5 paquetes	3-5 paquetes
P4	Chantenay	Chantenay	Chantenay
P5	Al voleo	Al voleo	Al voleo
P6	No	Un rociador que permite separar un poco las semillas	Un rociador al que se le colocan unas tapas que varían la cantidad de semilla de salida por la cantidad de orificios de la tapa
P7	5 h / 1 persona	12 horas / 3 personas	12 horas /3 personas
P8	60-70 %	60-70 %	60-70 %
P9	Sí, ya que no todas crecían de manera adecuada no se podían vender o no se les ganaba lo mismo	Sí, ya que no todas crecían de manera adecuada no se podían vender o no se les ganaba lo mismo	Sí, ya que no todas crecían de manera adecuada no se podían vender o no se les ganaba lo mismo
P10	No	Rociador	Rociador con diferente cantidad de semilla de salida
P11	Sí, ya que se aprovecha mejor la cantidad de semilla utilizada y el espacio de siembra	Sí, ya que se aprovecha mejor la cantidad de semilla utilizada y el espacio de siembra	Sí, ya que se aprovecha mejor la cantidad de semilla utilizada y el espacio de siembra
P12	Que se pueda manejar fácilmente	Que se pueda manejar fácilmente, que se desenvuelva bien en el terreno	Que se pueda manejar fácilmente, que se desenvuelva bien en el terreno, preferiblemente que no sea tan grande

La finca del señor José Figueroa está ubicada cerca a otros cultivadores de zanahoria, por lo cual él nos pudo brindar información a groso modo acerca de la cantidad de terreno sem-

brado por dichos cultivadores, afirmando que al igual que él, sembraban la misma cantidad de terreno. Esta información también fue de apoyo y junto con la consignada en la tabla se tuvieron en cuenta aspectos importantes para realizar el diseño y levantar los requerimientos para el robot del prototipo y el sistema de siembra específicamente.

### 5.1.2. Identificación del terreno de cultivo de zanahoria

Se realizó la identificación de un terreno donde se cultiva zanahoria, allí se tuvieron en cuenta algunas características del mismo con el fin de tener ideas clave para el diseño del prototipo, pues a pesar de que no se realice la evaluación en el terreno real de zanahoria, el fin del robot es trabajar sobre uno de estos, por ello, se llevó a cabo una observación sobre el clima, el terreno en general y el suelo, los cuales son factores o características que influyen en el desempeño del robot y por ende tenerlas en cuenta permite obtener un diseño basado en las condiciones reales a las que se verá sometido el mismo, (ver tabla **5-2**).

**Tabla 5-2.:** *Características del terreno para el diseño del prototipo*

Características del terreno	
Condición climática	El clima del terreno varia dependiendo de la temporada; en invierno, hay bastante neblina por la mañana, llegando el medio día se empieza a disipar, pueden haber lloviznas durante todo el día, solo en la mañana o en horas de la tarde. En verano, la neblina no es densa y dura pocas horas de la mañana, llegando el medio día y hasta por la tarde hay bastante sol.
Terreno	Es un terreno irregular y semi llano, con una inclinación aproximada de 2.5° medidos con Clinometer [Play, 2018], una aplicación que mide el ángulo de las pendientes (ver figuras <b>5-2</b> y <b>5-3</b> ).
Suelo	El suelo del terreno al momento de la siembra puede clasificarse como arenoso, con cierto nivel de humedad, lo que le confiere a la raíz principal la facilidad de penetrar el suelo y engrosarse.



**Figura 5-2.:** Cultivo de zanahoria, etapa inicial



**Figura 5-3.:** Cultivo de zanahoria, etapa inicial

### **5.1.3. Requerimientos**

Los requerimientos fueron definidos a partir de las bases encontradas en la literatura y de entrevistas y visitas realizadas en las fincas de tres medianos cultivadores, teniendo en cuenta la construcción del robot y los fundamentos para la siembra de zanahoria.

#### **5.1.3.1. Requerimientos Funcionales**

Los requerimientos de funcionalidad se obtienen no solo desde la solución propuesta sino también desde la perspectiva del usuario final

- Debe lograr una profundidad de siembra de 1 a 1,5 cm

- Debe mantener distancias entre semillas de 6-7 cm
- Debe adaptarse al terreno de plantación
- Debe tener la capacidad de depositar de 1 o 2 semillas al momento de la siembra
- El prototipo debe mantener estabilidad en su recorrido, es decir, debe mantener una línea recta sin oscilaciones en su recorrido
- El prototipo debe evitar hundirse en el terreno
- El sistema de cubrimiento no debe compactar el terreno

#### **5.1.3.2. Requerimientos Operacionales**

Para los requerimientos operacionales también es importante contemplar el punto de vista del usuario final, ya que hay ciertos aspectos que pueden no tenerse en cuenta

- La operación del prototipo debe ser intuitiva, es decir, cualquier persona lo puede manipular sin tener conocimientos de robótica, electrónica y demás
- El prototipo debe ser inalámbrico

#### **5.1.3.3. Requerimientos de Calidad**

Los requerimientos de calidad están basados en proporcionar un prototipo robusto, duradero y con precisión y así garantizar al usuario una experiencia de uso con el producto

- El sitio de ubicación de elementos electrónicos debe ser “hermético”
- Debe soportar la humedad y exposición al sol del terreno

#### **5.1.4. Estructura del Robot Móvil**

El robot móvil corresponde al cuerpo del robot, es decir al chasis del carro específicamente, para definir su diseño, fue necesario realizar tablas de decisión que permitieron organizar de acuerdo a los requerimientos definidos qué opción para cada ítem era la más acertada o la que más se acercaba a lo que el prototipo debía comprender.

Por cada decisión a tomar se encuentran dos tablas, la primera contiene un listado de los requerimientos y en frente el porcentaje de relevancia de acuerdo a lo consignado en literatura y en las encuestas y visitas, para dar un total de 100 por ciento, la segunda tabla muestra las opciones de solución, cada una de estas se evalúa de 0 a 5 siendo 5 la mejor calificación y al final de acuerdo a su relevancia de define un valor, el mayor puntaje indicará cuál fue la decisión tomada.

#### 5.1.4.1. Sistema de locomoción

El sistema de locomoción define cómo se desplaza el robot, en este caso específico fue importante tener en cuenta la forma del terreno en donde se probaría y las características generales que pudiesen generar alteraciones durante la trayectoria del mismo. Por esta razón, se incluyeron requerimientos, entre los cuales se encuentra: Estabilidad, la cual está ligada a la capacidad del prototipo para mantenerse en equilibrio ante las perturbaciones; su maniobrabilidad, que se refiere específicamente a la habilidad con que realiza el control del movimiento a medida que recorre la ruta; su mantenimiento, teniendo en cuenta que el proyecto se desarrolla en una finca, debe ser de fácil mantenimiento ante algún daño o problema presentado y de igual manera manteniendo un costo mínimo; por último, su consumo energético bajo, lo cual es importante ya que evita tener que recargar constantemente las baterías [García García Rafael Adrian1, 2016] [Centro universitario UAEM Zumpango, 2015], estos requerimientos se encuentran en la tabla 5-3 junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente en la tabla 5-4 las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-3.: Requerimientos y su relevancia**

Requirimientos	Relevancia
1. Estabilidad en el terreno de siembra	40 %
2. Maniobrabilidad	30 %
3. Mantenimiento	15 %
4. Bajo consumo energético	15 %

**Tabla 5-4.: Ponderación a partir de requerimientos**

Locomoción	Requerimientos				Total
	1	2	3	4	
Ruedas	5	4.5	4.5	4	4.625
Extremidades	2.5	2	3	2.5	2.425
Oruga	5	2.5	3	2	3.5

### 5.1.4.2. Configuración del robot

Para realizar el levantamiento de requerimientos en relación a la base del cuerpo del robot se tuvo en cuenta: su capacidad para acomodarse en el terreno del cultivo de zanahoria debido a que el terreno cuenta con ERAS de siembra con un ancho específico; que contara con un eje de curvatura corto evitando así que requiriera mucho espacio para ir de ERA en ERA de siembra junto con una estrategia de control que no fuese compleja de llevar a cabo; Así mismo, que mantuviese al mínimo la pérdida de tracción para evitar errores en el recorrido; todo esto manteniendo un consumo energético bajo para no tener que recargar constantemente la batería y finalmente, que fuese de fácil mantenimiento, esto precisamente teniendo en cuenta el sitio de prueba del prototipo sembrador [Cánovas, 2011] [Alvaro García López, 2010], estos requerimientos se encuentran en la tabla 5-5 junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente la tabla 5-6 con las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-5.:** *Requerimientos y su relevancia*

Requirimientos	Relevancia
1. Capacidad para acomodarse fácilmente al terreno de cultivo (surco)	25 %
2. Estrategia de control y radio de curvatura libre	30 %
3. Pérdida mínima de tracción	15 %
4. Costo energético bajo	15 %
5. Facilidad de mantenimiento	15 %

**Tabla 5-6.:** *Ponderación a partir de requerimientos*

Disp. Ruedas	Requerimientos					Total
	1	2	3	4	5	
Triciclo	0	2	2	4.5	5	2.325
Uniciclo	5	5	5	4	4	4.7
Ackerman	5	4	5	4	3.5	4.325
Omnidireccional	5	3.5	5	2	3	3.8

#### 5.1.4.3. Nivel de autonomía del robot móvil

La autonomía de un robot define la proveniencia de las entradas de control a éste, es decir, si su movimiento, desplazamiento o acciones son ejecutadas por sí mismo, son órdenes externas o están divididas en entradas externas y propias. Para definir la autonomía se tuvieron en cuenta los requerimientos a cumplir; primero, dicha autonomía debe permitir al prototipo desenvolverse bien en los surcos de siembra. Segundo, la precisión en términos de posición permite tener mayor control y veracidad de que la siembra de las semillas se está realizando correctamente. Por último, el requerimiento más importante es garantizar las distancias de la siembra [Miguel A. María Malfaz, 2010] [Jaime Pulido Fentanes, 2012], estos requerimientos se encuentran en la tabla 5-7 junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente en la tabla 5-8 las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-7.:** *Requerimientos y su relevancia*

Requerimientos	Relevancia
1. Moverse bien por los surcos	15 %
2. Permita la mayor precisión en términos de coordenadas de posición	40 %
3. Permita garantizar las distancias de siembra	45 %

**Tabla 5-8.:** *Ponderación a partir de requerimientos*

Tipo de movilidad	Requerimientos			Total
	1	2	3	
Automático	3	3	4	3.45
Semiautomático	4	4.5	4.5	4.42
Teleoperado	4.7	4	2	3.2

#### 5.1.4.4. Sistema de navegación

Para el sistema de navegación del prototipo se buscó lograr un buen desempeño en el terreno teniendo en cuenta las características de éste. Por ello, se plantearon tres posibles soluciones que pudieran cumplir con los requerimientos establecidos:

- Con la cámara se realizan cambios de espacios de color con el fin de diferenciar los surcos del camino donde se desplaza el prototipo [Etxeberria, 2010].
- Los sensores ultrasonicos se ubican de tal forma que asemejan el montaje utilizado en los robots seguidores de línea, los sensores se ubican en los extremos del prototipo para poder realizar una diferencia de altura entre el sendero y el surco [Mariana N. Ibarra Bonilla, 2009].
- En el caso del control de alto nivel del prototipo con camino definido, es necesario establecer la distancia que debe recorrer el prototipo para que así el control pueda acomodarse al entorno y realizar los diferentes cálculos para poder recorrer el camino de manera correcta [Baturone, 2001].

#### 5.1.4.5. Materiales a utilizar

Para definir los materiales se tuvo en cuenta el clima del lugar de siembra, el manejo que se le daría y su cuidado, por esta razón, se incluyeron requerimientos tales como resistencia a golpes y rigidez, adicionalmente que fuese liviano de tal manera que no tuviera impacto en términos de compactación del terreno debido a su peso, y por último que el material fuese comercial o de fácil acceso ya que así se garantiza que en caso de algún daño o desgaste de una pieza el arreglo esté al alcance del usuario [García García Rafael Adrian1, 2016] [Cook, 2015], estos requerimientos se encuentran en la tabla 5-9 junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente en la tabla 5-10 las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-9.: Requerimientos y su relevancia**

Requirimientos	Relevancia
1. Reistencia a golpes	20 %
2. Rigidez	25 %
3. Soporte humedad y calor sin mayor afectación	10 %
4. Liviano	30 %
5. Comercial/Fácil acceso	15 %

**Tabla 5-10.: Ponderación a partir de requerimientos**

Materiales	Requerimientos					Total
	1	2	3	4	5	
PVC	3	3.5	4	4.5	4	3.8
Aluminio	4.5	4.5	4	3.5	4	4.1
Acero Inoxidable	4.5	4.5	4	2	3.5	3.5

## 5.1.5. Sistema de Siembra

### 5.1.5.1. Método de excavación

De acuerdo a las generalidades de la zanahoria, debido a que esta no requiere de una gran profundidad al momento de siembra, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: que realizara una excavación en línea continua debido al tamaño de la semilla, pues de realizarse un hoyo por siembra existiría la posibilidad de que este se cerrara fácilmente; que no invirtiera el suelo, pues esto trae consigo diversos efectos negativos en la interacción necesaria para el desarrollo de la zanahoria; que excavara a menos de 1.5cm, como se menciona en la forma de cultivo, favoreciendo así la germinación de la semilla y por último que compactara al mínimo el suelo [(INIA) Ministerio de agricultura, 2012] [Napoleón Bernal, 2007], estos requerimientos se encuentran en la tabla **5-11** junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente en la tabla **5-12** las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-11.:** *Requerimientos y su relevancia*

Requirimientos	Relevancia
1. Debe realizar la excavación en línea continua	20 %
2. No debe invertir el suelo	25 %
3. Debe realizar la excavación a menos de 1.5cm de profundidad	30 %
4. Compactación mínima al suelo	25 %

**Tabla 5-12.:** *Ponderación a partir de requerimientos*

Met. excavación	Requerimientos				Total
	1	2	3	4	
Reja y vertedera	5	0	0	5	2.25
Discos	5	2	0	2	2
Cinzel	5	5	5	5	5

### 5.1.5.2. Método de posicionamiento y cantidad de semilla

El cómo y cuánta semilla se siembra es el fundamento de este proyecto, por ende, los requerimientos son muy específicos en cuando a distancias y cantidad. La siembra debe realizarse cada 7cm y se debe disponer entre 1 y 2 semillas. Adicionalmente, teniendo en cuenta que lo ideal no era sembrar semilla por semilla por cuestiones de energía, se adicionó otro requerimiento que especifica que se debe depositar una fila de semillas al tiempo, lo que mejoraría el tiempo de siembra del prototipo. Por último, se tuvo en cuenta que su consumo energético fuese bajo debido al lugar de prueba [Mack, 1980], estos requerimientos se encuentran en la tabla 5-13 junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente en la tabla 5-14 las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-13.:** *Requerimientos y su relevancia*

Requerimientos	Relevancia
1. Debe disponer la semilla cada 7 cm	30 %
2. Deben depositarse entre 1 y 2 semillas	30 %
3. Debe depositar la fila de semillas al tiempo	25 %
4. Bajo consumo energético	15 %

**Tabla 5-14.:** *Ponderación a partir de requerimientos*

Pos. y cant. de semilla	Requerimientos				Total
	1	2	3	4	
Tolva-1 rodillo-orificios a la medida-mangueras	5	5	5	4.5	4.925
Tolva-filas de rodillos-orificios a la medida-mangueras	5	5	5	2.5	4.55
Tolva-inyector	5	5	2	2	3.8
Tolva-bandeja-método sensado (peso deposición)	5	3	5	4	4.25

### 5.1.5.3. Método de cubrimiento de semilla

Para definir el método de cubrimiento se establecieron los siguientes requerimientos a cumplir: el cubrimiento de la semilla debe ser superficial y sin terrones de suelo de tal manera que quede lo más homogéneo posible; no debe mover las semillas porque se vería afectada la

distancia de siembra, y, por lo tanto, tampoco se puede frenar por alguna razón en ninguna parte del recorrido ya que podría generar levantamiento de suelo y mover las semillas [Gaviola, 2018], estos requerimientos se encuentran en la tabla **5-15** junto con su respectiva relevancia en porcentaje y adicionalmente en la tabla **5-16** las opciones y el valor de cada uno de acuerdo a la ponderación.

**Tabla 5-15.:** *Requerimientos y su relevancia*

Requirimientos	Relevancia
1. Cubrimiento Superficial	30 %
2. No mueva las semillas	30 %
3. No forme terrones de suelo	20 %
4. No se quede trabado en el terreno	20 %

**Tabla 5-16.:** *Ponderación a partir de requerimientos*

Cubrimiento	Requerimientos				Total
	1	2	3	4	
Arrastre con placa compacta plástica	3	3.5	2.5	2	2.85
Barrido con escobilla	4	4	3.5	4.5	4
Arrastre con tira de caucho	3	3.5	3	4	3.35

#### 5.1.5.4. Selección de los componentes electrónicos

##### Cálculos torque y velocidad (RPM) motor

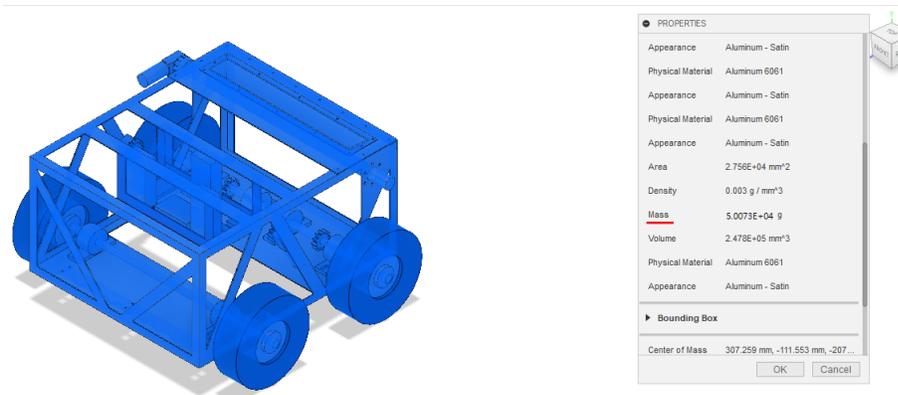
Primero se calculó el torque de los motores con la siguiente ecuación (5-1)

$$\text{Torque}(Nm) = \mu \cdot N \cdot r \quad (5-1)$$

Ecuación 5-1 Torque de un motor

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre las ruedas y el suelo [Castillo, 2017];  $r$  es el radio

de las ruedas (en metros) y  $N$  es el peso que actúa en las ruedas. Para determinar  $N$  se utilizó la información brindada por el programa "Fusion 360" donde se realizó el diseño del prototipo con los materiales de construcción (figura 5-4), ya que las unidades son en Newton se multiplica por la gravedad y se divide en 2 ya que se distribuye equitativamente sobre las dos ruedas que llevarán los actuadores



**Figura 5-4.:** Peso del prototipo obtenido del CAD

Reemplazando los datos en la ecuación se obtiene un torque en Nm (ecuación 5-2)

$$Torque(Nm) = 0,2 \cdot \frac{50 \text{ Kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{2} \cdot 0,13 \text{ m} = 6,37 Nm \quad (5-2)$$

Ecuación 5-2 Torque de un motor

El torque también se puede dar en kg/cm, y para ésto se utiliza la ecuación 5.1.5.4

$$1 \text{ Nm} \rightarrow 10,19716 \text{ kg/cm}$$

$$6,37 \text{ Nm} \rightarrow x$$

$$x = 64,95 \text{ Kg/cm}$$

Ecuación 5.1.5.4 Conversión de Nm a Kg/cm

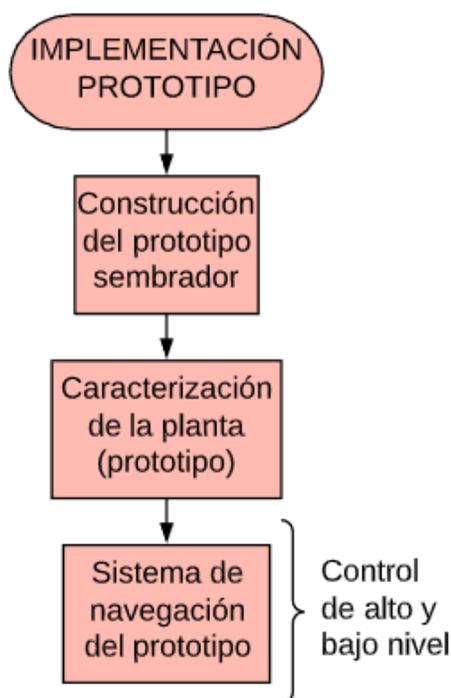
Teniendo en cuenta que la distancia que debe recorrer el prototipo son 7cm, que lo más importante es garantizar dicha distancia y las profundidades de siembra, el prototipo no puede ir a una velocidad alta ya que por las irregularidades del terreno se puede desestabilizar y afectar la siembra. Por lo cual la característica principal para la elección de los motores es el torque calculado, ya que se debe garantizar la movilización fluida del prototipo en el terreno, es decir que pueda – las irregularidades del terreno sin que se sobre esfuerce o se dañe

### Componentes electrónicos

- Motor Dc ref. GW40-58-555, 24V, torque 70 Kg/cm, 40 RPM.

- Raspberry pi 3b
- Arduino uno
- IMU ref. 6050
- Módulo puente H BTS7960, driver de los motores que tiene una capacidad de soportar 43A, para proteger Arduino de la corriente que genere los motores.

## 5.2. Segunda etapa: Implementación del prototipo sembrador



**Figura 5-5.:** Diagrama de flujo actividades para definir la implementación

Como se puede observar en el diagrama de la figura 5-5, se incluyen las actividades a realizar para cumplir a cabalidad el segundo objetivo específico del proyecto relacionado a la implementación del mismo. En primer lugar se construyó el prototipo sembrador a partir del diseño previamente planteado, posteriormente se caracterizó el robot y finalmente se implementó el sistema de control y navegación del robot sembrador.

### 5.2.1. Construcción del prototipo

Se lleva a cabo un proceso de construcción por secciones, ya que en primer lugar se manda a construir el sistema de siembra, es decir, todo lo relacionado a la distribución de la semilla en el suelo, lo cual consta de 3 partes principalmente, la excavación, la tolva de distribución con una capacidad de almacenamiento de semilla de 0.53 Kg (que alcanzan para sembrar 1490 m<sup>2</sup> aproximadamente) y mangueras que le permiten seguir el trayecto hasta el suelo. Para la excavación se utilizan el suelo los dientes de un rastrillo que simulan el cincel; la tolva se construye teniendo en cuenta los posibles escapes de la semilla al lugar de distribución, por ello el rodillo que lleva las semillas de la tolva a las mangueras que guían el trayecto se recubre y este es movido con la ayuda de un motor DC. En segundo lugar se construye la estructura del robot móvil que hace referencia a la parte donde se adapta este sistema de siembra para permitir su desplazamiento por medio de un seguidor de camino programado. Dicho desplazamiento se realiza con una transmisión de los motores de manera independiente para la rueda derecha e izquierda trasera a través de una cadena.

### 5.2.2. Caracterización de la Planta

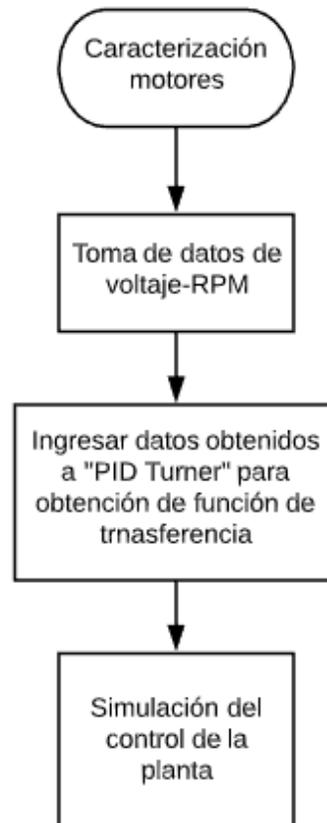


Figura 5-6.: Diagrama de flujo del proceso de caracterización del motor.

De acuerdo al diagrama presentado en la figura 5-6, para realizar la caracterización de los tres motores, primero se utilizó un programa en Arduino que mide las RPM (utilizando el encoder que viene incorporado en cada motor) generadas en subidas y bajadas de voltaje (4-10, 10-4), lo cual genera una pirámide, se tomaron 3 de éstas para tener suficientes datos con los cuales hacer el cálculo de la función de transferencia. Posteriormente, dichos datos de entrada y salida se ingresan a 'PID TURNER', aplicación de MATLAB, que permite hallar la función de transferencia a partir de la respuesta de un sistema a una entrada.

PID TURNER calcula la función de transferencia con base en una estructura previamente seleccionada, por ejemplo, un polo real, dos polos imaginarios, entre otros; teniendo en cuenta que la estructura de la función de transferencia de un motor DC suele ser de segundo orden, o también puede ser descrita como de primer orden cuando existe un polo dominante, ya que la acción que el otro polo ejercerá sobre el control es mínima y puede tomarse como despreciable para la respuesta del sistema y por lo cual puede representarse como un sistema de primer orden; adicionalmente, es importante tener en cuenta que el motor tendrá una carga que serán las ruedas, por lo cual la inercia, la masa de la rueda y la fricción formarán parte del modelo de dichos motores y por lo cual harían que su función de transferencia pudiera ser de un orden mayor al segundo [(NCTU) National Chiao Tung University, 2015] [Zaccarian, 2008]. Sin embargo, las aproximaciones que hace 'PID TURNER' son de orden dos y por lo cual se seleccionó dicha estructura para que éste calculara la función de transferencia de los motores.

Posterior a la caracterización de la respuesta de los sistemas frente a una entrada, se realizó la medida del pico de corriente de cada motor con el fin de tener el valor exacto de la corriente que necesita el motor para empezar a funcionar (ver figuras 5-7 5-8 y 5-9 respectivamente). Esto se realizó midiendo la corriente que pasa por el terminal de alimentación del motor justo en el momento en el que se suministra energía.



Figura 5-7.: Pico de corriente (A) motor 1



**Figura 5-8.:** Pico de corriente (A) motor 2



**Figura 5-9.:** Pico de corriente (A) motor del sistema de siembra

### Selección baterías

Para determinar las características que debe tener la batería para suplir el consumo energético del prototipo, se tuvo en cuenta el voltaje y el pico de corriente (medido anteriormente) de los motores, y el consumo energético de los sistemas embebidos y sensores.

- Motor Dc ref. GW40-58-555: 24V, pico de corriente 3A [Aliexpress, 2013].
- Raspberry pi 3b: 5V, 230 mA [Raspberry, 2016]
- Arduino uno: 5V, 250 mA [Octopart, 2010]
- IMU ref. 6050: 2.375–3.46V, 10mA aprox. [Invensense, 2013]

Teniendo en cuenta lo anterior, la batería tiene que ser de 24 V y debe proporcionar como mínimo 4A para tener 1A demás en caso de que el pico de corriente de los motores aumente. Adicionalmente, debe ser una batería recargable (según los requerimientos mencionados anteriormente), tampoco debe ser muy pesada ni muy grande debido al tamaño del prototipo. Por lo cual se escogieron las baterías tipo lipo que permiten cumplir con los requerimientos; sin embargo, comercialmente en Colombia no es usual encontrar baterías con las características requeridas, por lo cual se optó por tener dos baterías de 11.1V, 5200 mAh conectadas en serie para que se tenga un voltaje final de 22.2V para alimentar los motores.

### 5.2.3. Sistema de navegación del prototipo

El seguidor de camino está basado en un modelo cinemático de un robot tipo unicilo, debido a que el robot de este trabajo es del mismo tipo; y así mismo, se aplica un control adaptativo basado en éste [Victor H. Andaluz, 2011](2). Este seguidor está dividido en control de alto y bajo nivel.

#### 5.2.3.1. Control de alto nivel

La finalidad del control de alto nivel es determinar un vector de velocidades de maniobrabilidad ( $V_d$ ) que permita seguir un camino deseado. Para esto, se tuvo en cuenta el modelo cinemático holonómico de un robot unicilo [Victor H. Andaluz, 2011] como se muestra en la ecuación 5.2.3.1.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v\cos(\varphi) - a\omega\sin(\varphi) \\ \dot{y} &= v\sin(\varphi) + a\omega\cos(\varphi) \\ \omega &= \dot{\varphi}\end{aligned}$$

Ecuación 5.2.3.1 Modelo cinemático holonómico

Que puede definirse de forma general como se muestra en la ecuación 5.2.3.1. Donde  $J$  representa el Jacobiano que relaciona las velocidades del punto de control ( $[\dot{x}, \dot{y}]^T$ ) con las velocidades del robot ( $V$ )

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = JV$$

Ecuación 5.2.3.1 Forma general modelo cinemático

La ecuación 5.2.3.1 muestra cómo está definido el Jacobiano. Debido a que se tiene en cuenta el desplazamiento del punto de control,  $a$  representa la distancia que hay entre el centro del eje de las ruedas y el punto control, y  $\varphi$  es el ángulo entre el robot y el camino deseado

$$J = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & a \cos(\varphi) \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.2.3.1 Jacobiano

$V$  contempla la velocidad lineal y angular del robot  $(v, \omega)$ . Por lo cual el modelo está definido matricialmente como lo muestra la ecuación 5.2.3.1

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & a \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.2.3.1 Forma matricial del modelo cinemático del robot

Donde  $v$ , que representa la velocidad lineal del robot, está definida como el promedio entre las velocidades lineales de cada rueda  $(v_r + v_l)$  multiplicada por el radio  $(R)$  de las ruedas, como lo muestra la ecuación 5.2.3.1.

$$v = R \cdot \frac{v_r + v_l}{2}$$

Ecuación 5.2.3.1 Velocidad lineal del robot

Ya que la finalidad del controlador es determinar las velocidades de maniobrabilidad del robot, se despejó de la ecuación 5.2.3.1 la velocidad

$$V_d = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.2.3.1 Forma general para hallar el vector de velocidades deseadas

Teniendo en cuenta la ecuación anterior es necesario calcular el  $J^{-1}$ , que da como resultado lo mostrado en la ecuación 5-3

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\frac{1}{a} \sin(\varphi) & \frac{1}{a} \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

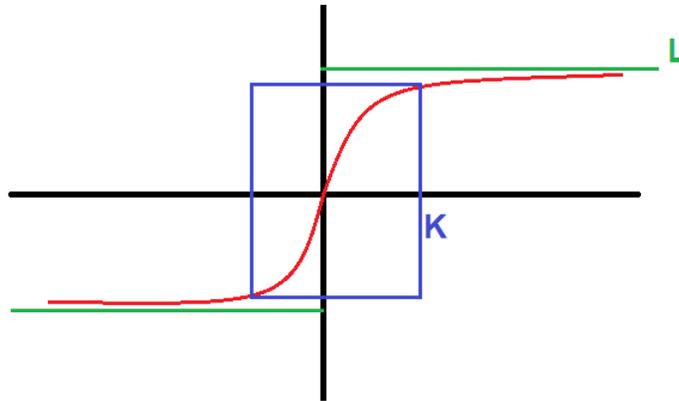
Ecuación 5-3 Inverso del Jacobiano

El controlador implementado se basó en el trabajo de [Victor H. Andaluz, 2011] que define  $[\dot{x}, \dot{y}]^T$  como (ecuación 5-4)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_p \cos(\varphi_d) + L_x \tanh\left(\frac{K_x}{L_x} \tilde{x}\right) \\ v_p \sin(\varphi_d) + L_y \tanh\left(\frac{K_y}{L_y} \tilde{y}\right) \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

Ecuación 5-4 Vector  $[\dot{x}, \dot{y}]^T$  deseado

Donde L limita el valor máximo y mínimo de la función tanh, esto significa limitar la velocidad de respuesta con el fin de no saturar los actuadores. Por otro lado, K permite modificar la pendiente de la función haciendo que el sistema de control tenga un respuesta suave, es decir, que el robot no tendrá movimientos abruptos durante el recorrido.  $v_p$  representa la velocidad que tendrá el robot. La figura 5-10 muestra una representación gráfica de lo mencionado anteriormente



**Figura 5-10.:** Representación gráfica de las modificaciones de L y K en la función  $h$

$\tilde{x}$  y  $\tilde{y}$ , representan el error entre la posición del robot y la deseada (ecuación 5.2.3.1)

$$\tilde{x} = x_d - x$$

$$\tilde{y} = y_d - y$$

Ecuación 5.2.3.1 Definición de  $\tilde{x}\tilde{y}$

$\varphi_d$  hace referencia al ángulo que se desea tener entre el robot y el camino y está definido como e muestra en la ecuación 5-5

$$\varphi_d = \arctan \frac{\tilde{y}}{\tilde{x}} \quad (5-5)$$

Ecuación 5-5 Ángulo deseado

Finalmente, la salida del controlador es un vector de velocidad que comprende velocidad lineal y angular como se muestra en la ecuación 5-6

$$V_d = \begin{bmatrix} v_d \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

Ecuación 5-6 Vector de velocidades deseadas

Ya que la salida de este control es la entrada al de bajo nivel, se realiza el cálculo de la velocidad deseada para cada motor como se muestra en la ecuación 5.2.3.1

$$V_r = v_d + \frac{\omega_d \cdot 0,13}{2}$$
$$V_l = v_d - \frac{\omega_d \cdot 0,13}{2}$$

Ecuación 5.2.3.1 Definición de la velocidad deseada para cada motor

### 5.2.3.2. Control de bajo nivel

Para realizar el control de los motores se realizó una primera aproximación al control necesario para cumplir con los requerimientos de tiempo de establecimiento y % de sobrepico. Para ésto se utilizó la herramienta 'SISOTOOL' de MATLAB que permite visualizar el lugar de las raíces del sistema y así facilitar el diseño del controlador; posteriormente, se ingresa la función de transferencia a 'SISOTOOL' junto con los requerimientos establecidos para que calcule la región de diseño; finalmente, se procede a hallar el controlador que permita cumplir con los requerimientos establecidos. Teniendo en cuenta el resultado del procedimiento anterior, se procede a realizar una sintonización para hallar los valores de las ganancias del controlador que permitan obtener la mejor respuesta del sistema, es decir, el menor error. Para ello, se implementó la técnica de sintonización Algoritmo Genético, que calcula la combinación de valores que permitan obtener la mejor respuesta de la planta (figura 5-11).



**Figura 5-11.:** Diagrama de flujo del funcionamiento general del robot móvil

### Definición de parámetro de entrada

Los parámetros que se deben establecer para poder realizar el algoritmo genético son: Cantidad de cromosomas, número de individuos, número de generaciones, el valor mínimo y máximo que puedan tener los cromosomas,

- Cantidad de cromosomas

Los cromosomas en el Algoritmo Genético representan las variables que se desean calcular, en este caso, son las  $K$  que representan la ganancia de cada control, es decir  $K$ ,  $K_d$  y  $K_i$ , por lo cual serían 3 cromosomas.

- Valor mínimo y máximo de los cromosomas

El valor mínimo y máximo representa el rango de valores que puede tener un cromosoma, en este caso el rango de valores donde la planta cumple con los requerimientos de control mencionados anteriormente. Para esto, se tuvo en cuenta la naturaleza de la planta (img) que es estable, lo que quiere decir que sus polos se encuentran en el lado izquierdo de la gráfica por lo cual el mínimo valor es cero, ya que un valor inferior haría que la planta desplazara sus polos a la parte derecha de la gráfica y se volviera inestable, también se utilizó la región de diseño generada en ‘SISOTOOL’ para saber el valor máximo que puede tomar la ganancia sin que el tiempo de establecimiento fuera tan pequeño que no se pueda implementar.

- Número de individuos y Número de generaciones

Un individuo contiene la información de los cromosomas, por lo tanto, el número de individuos representa la cantidad de combinaciones de los tres cromosomas (dentro del rango especificado) que se tendrán en cuenta para el proceso de mutación. Por otro lado, las generaciones representan las combinaciones de los individuos que mejor desempeño tuvieron (representan los datos “padres”) y de los cuales se generarán nuevos individuos (“descendencia”) a través de su combinación y/o mutación de los cromosomas. Por lo cuál el número de generaciones representa la cantidad de descendencia que se obtendrán de los datos “padres”. Para establecer estas cantidades se buscó en la literatura trabajos que tuvieran dentro de su metodología la sintonización de un control PID por medio de algoritmo genético [Colorado Arellano Othon, 2018], [Andri Mirzal, 2014], [Mostafa, 2013], [J.M.Herrero, 2005]. Posteriormente se utilizaron dichas cantidades para el proceso del algoritmo genético y se evaluó el desempeño del mismo a través de la validación de MBF (por sus siglas en inglés Mean Best Fitness), el cuál evalúa la media de los mejores individuos en cada generación, y así obtener las cantidades que generen el menor valor de dicha media.

### Creación de la primera generación

La primera generación de datos son los que se utilizan como datos “padres” para la creación de las demás generaciones. Para esto, primero se generaron los individuos con valores de cromosoma aleatorios (dentro del rango establecido); después, se realizó el cálculo de la Función

de Coste, que consiste en calcular el error (ITAE) ante una entrada paso al controlador, este proceso se realizó con cada individuo; posteriormente, se escogieron los individuos que tuvieran el mejor desempeño minimizando la función de coste. Finalmente, se realiza la creación de la población inicial, que está generada por lo mejores individuos obtenidos anteriormente, para esto se realizaron dos métodos: crossover y después mutación. El crossover consiste en tomar los cromosomas de dos individuos para generar uno nuevo; teniendo los nuevos individuos se realiza una mutación en alguno de los cromosomas, para ello, se le asigna un valor aleatorio (dentro del rango) a uno de los cromosomas, también escogido aleatoriamente.

### Creación de las generaciones establecidas

Teniendo la primera generación, o población inicial, se procede a crear la cantidad de generaciones previamente establecida. Para ello se realiza el mismo procedimiento anterior: se calcula la función de coste, se escogen los individuos con mejor desempeño y se generan nuevos individuos a partir de éstos, este proceso se realiza la cantidad de generaciones deseada.

### Determinación del mejor individuo

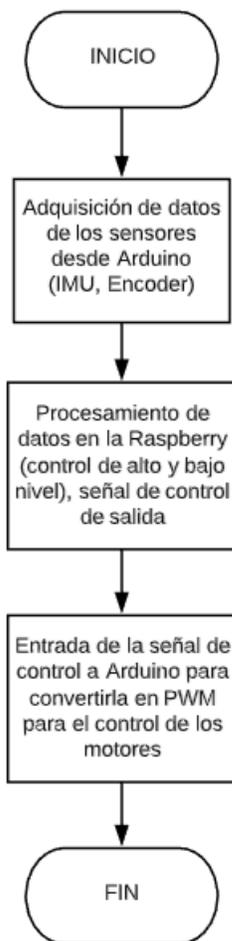
Por último, cuando se obtiene la última generación de individuos se procede a calcular la función de coste para así poder encontrar el que mejor desempeño tuvo al minimizar la función de coste y cuyos cromosomas serán los que se implementarán en el control.

En la figura 5-12 se muestra un Seudo-código del Algoritmo Genético implementado, donde se muestran cada uno de los procesos mencionados anteriormente.

```
BEGIN /* Algoritmo Genético */  
    Creación primera generación  
    Creación población inicial  
    FOR Tamaño de generaciones deseadas DO  
        BEGIN /*Ciclo Reproductivo*/  
            Computar función de coste para cada individuo para conocer los mejores  
            individuos.  
            Ordenar de mayor a menos desempeño obtenido por los individuos  
            Generación de nuevos individuos a partir de los individuos con mejor  
            desempeño  
        END  
    Computar función de coste para la última generación obtenida  
    Selección del individuo con mejor desempeño  
END
```

Figura 5-12.: Seudo-código del Algoritmo Genético implementado

#### 5.2.4. Implementación del seguidor de camino



**Figura 5-13.:** Diagrama de flujo del funcionamiento general del robot móvil

La implementación del seguidor de camino comprende la adquisición de datos de los sensores que permitirán conocer la orientación del robot y su posición para posteriormente realizar los cálculos necesarios para generar la señal de control que permite seguir un camino programado y finalmente, enviar dicha señal de control a los actuadores (motores) del robot como se muestra en la (Figura 5-13).

##### 5.2.4.1. Adquisición de datos de los sensores

Para el control del robot es necesario conocer la velocidad de las ruedas ya que se utiliza para calcular la posición del robot; adicionalmente, es necesario conocer la orientación del robot durante el recorrido y así garantizar que está siguiendo el camino programado. Para conocer la velocidad de las ruedas se utilizan los encoders incorporados en cada uno de los motores, y para la orientación del robot se utilizan los datos del giroscopio de una MPU 60-

50; para la adquisición de los datos de estos sensores se utiliza Arduino, que posteriormente los publica a Topics para que puedan ser leídos desde ROS, (ver diagrama en la figura 5-14).

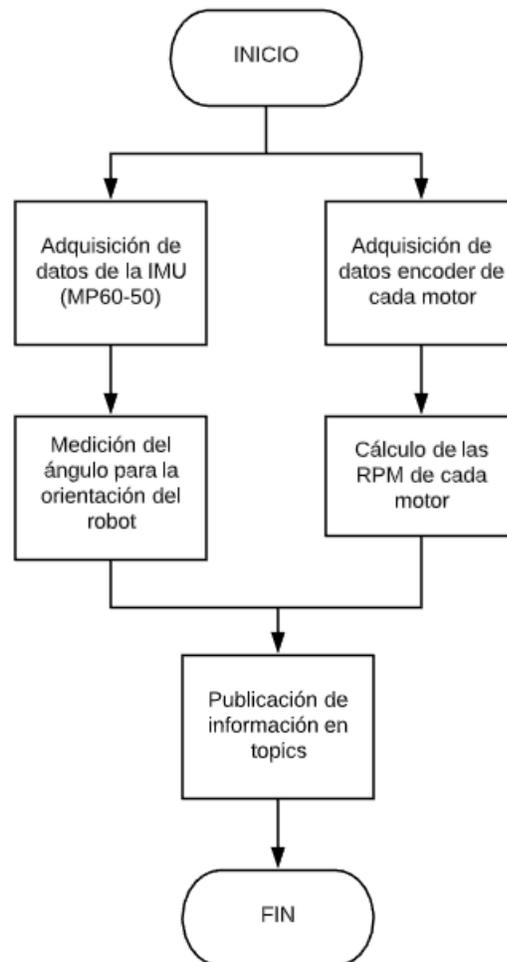


Figura 5-14.: Diagrama de flujo adquisición de datos de los sensores

- **Orientación por medio de giroscopio de la MPU 60-50**

Para la adquisición de los datos se utiliza una librería que permite adquirir la información de cada uno de los ejes que comprende tanto el acelerómetro como el giroscopio (x,y,z). La medición de la orientación comienza con la calibración del sensor, esto con el fin de disminuir errores relacionados con las escalas de los datos adquiridos; para ello, se estiman los offset que tienen los datos. Teniendo en cuenta que es necesario saber la orientación del robot, es decir, su rotación sobre el eje z (definido por la IMU) que indicará si está hacia la derecha o a la izquierda. Finalmente, el programa publica el ángulo obtenido en un Topic para que ROS tenga accesibilidad a esta información.

- **Velocidad de las ruedas por medio de encoder óptico**

La velocidad de las ruedas se calcula por medio de los pulsos del encoder utilizando

la interrupción “RISING” de Arduino que consiste en parar el programa cada vez que haya un flanco de subida en la entrada digital. Teniendo en cuenta que 22 pulsos representan una vuelta en el motor, el cálculo de las RPM se realiza calculando cuánto tiempo se demora el motor en dar una vuelta, es decir, en que se completen 22 pulsos, posteriormente se realiza una regla de tres (ecuación) para saber cuántas revoluciones se realizan en un minuto. Teniendo las RPM el programa las publica en un Topic para que ROS tenga accesibilidad a esta información. Esta programación se realizó para cada uno de los motores por separado, es decir, cada motor tiene su Arduino y, así mismo, un Topic diferente de publicación de la información.

### 5.2.4.2. Procesamiento de datos en la Raspberry (seguidor de camino)

El seguidor de camino se lleva a cabo desde ROS, está dividido en: control de alto nivel y bajo nivel. El primero, realiza el control de posición del robot, y el segundo, recibe el valor de referencia proveniente del primero y genera la señal de control para cada uno de los motores que permitirá alcanzar dicha referencia, (ver diagrama en la figura 5-15).

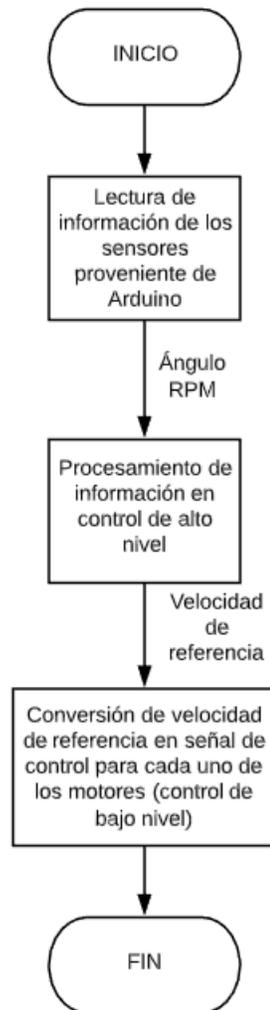
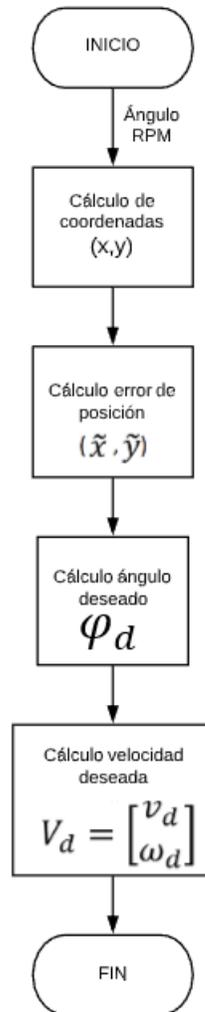


Figura 5-15.: Diagrama de flujo adquisición de datos de los sensores

- **Control en alto nivel**



**Figura 5-16.:** Diagrama de flujo adquisición de datos de los sensores

En la figura 5-16 se muestra el diagrama para la programación del seguidor de camino, en donde se realizó una programación por funciones, es decir, se realizó una función para cada uno de los procesos: el cálculo de las coordenadas x,y, el error de posición en cada uno de los ejes, el cálculo del ángulo deseado, el error entre el ángulo deseado y el actual, y el cálculo de la velocidad de referencia. Primero se crean los suscriptores a los topics de Arduino que contienen la velocidad de los motores y el ángulo de la MP60-50 y el suscriptor al topic que contiene el camino deseado y posteriormente están cada una de las funciones mencionadas anteriormente.

- **Control en bajo nivel**

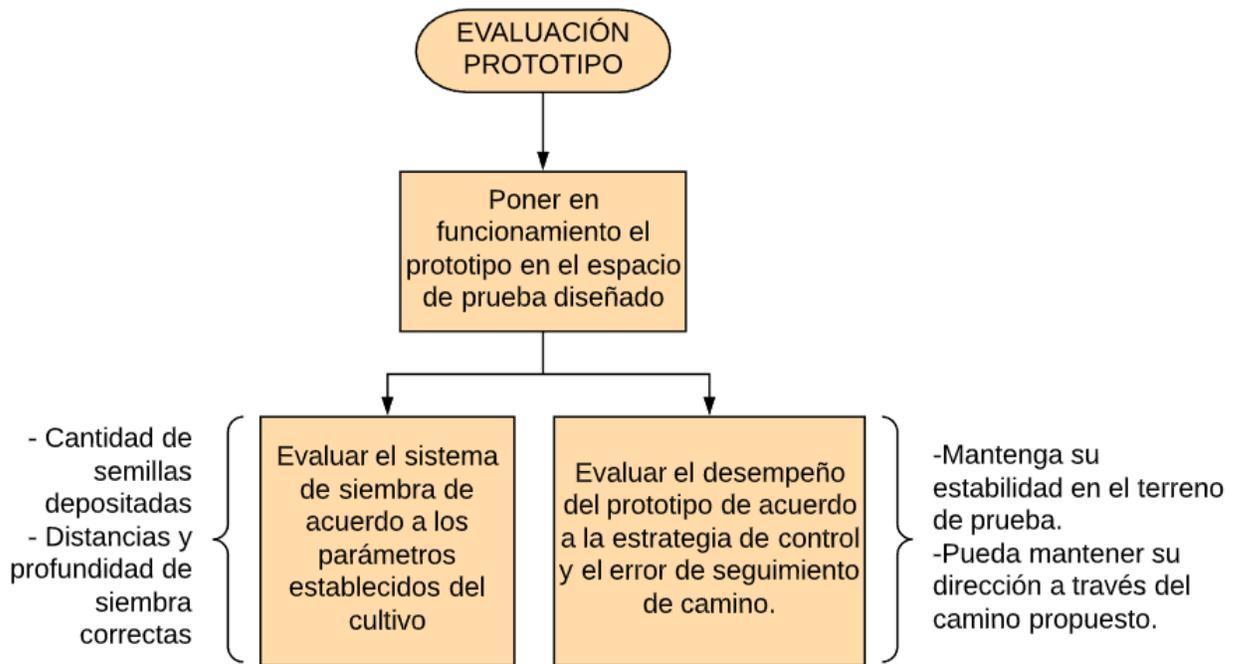
En el control de bajo nivel se recibe la velocidad de referencia proveniente del control de alto nivel, posteriormente se implementan los controladores PID de cada motor para

generar la señal de control de cada uno, finalmente, esta señal es publicada en un topic para que Arduino pueda acceder a ella.

#### 5.2.4.3. Lectura de señal de control en Arduino

La última etapa, consiste en la adquisición de la información proveniente del sistema de control (alto y bajo nivel) por medio de suscriptores al topic publicador de ROS. Posteriormente, dicha señal de control se convierte en una PWM que será la que permita la acción de los motores para alcanzar la posición deseada durante el recorrido.

### 5.3. Tercera etapa: Evaluación del prototipo sembrador



**Figura 5-17.:** Diagrama de flujo actividades para definir la evaluación

La tercera etapa está asociada a la evaluación del prototipo, para ello se tuvo en cuenta la puesta en marcha del robot en un espacio de prueba diseñado que permitiera evidenciar el correcto desempeño del prototipo de acuerdo a la estrategia de control y el error de seguimiento de camino, adicionalmente este espacio de prueba también permite evaluar la cantidad de semillas depositadas y las distancias y profundidad de plantación, este proceso se muestra en el diagrama de la figura 5-17.

### **5.3.1. Funcionamiento del prototipo**

#### **5.3.1.1. Estrategia de control**

Para evaluar el desempeño del robot, se tuvo en cuenta principalmente que este mantuviera su estabilidad en el trayecto y además la dirección deseada durante el mismo. Se realiza un recorrido de cuatro metros aproximadamente, simulando la forma en que avanzaría durante la siembra de encontrarse en un terreno real, para esto, se adaptan al camino dispuesto para el recorrido del robot algunas irregularidades que permiten mostrar en caso de existir algo parecido en un terreno real de cultivo de zanahoria, la respuesta ante dichos obstáculos y su capacidad para sobrellevarlos.

#### **5.3.1.2. Sistema de siembra**

Para comprobar el funcionamiento del sistema de siembra se diseña un espacio de prueba que simula las condiciones de un terreno de cultivo de zanahoria, lo que consiste básicamente en una ERA construída con las medidas de ancho y alto requeridas en la siembra. Se identifican en primer lugar las distancias de siembra guiadas por las mangueras durante el trayecto desde la tolva hasta el suelo; la profundidad alcanzada por la semilla de acuerdo a la excavación llevada a cabo por el cincel a medida que se avanza en el camino propuesto y finalmente, la cantidad de semilla dispuesta en cada una de las siembras que hace el robot, todos estos valores se evalúan teniendo en cuenta los parámetros establecidos por el cultivo.

# 6. Resultados y Discusión

## 6.1. Primera etapa: Diseño del prototipo sembrador

### 6.1.1. Estructura del robot móvil

#### 6.1.1.1. Sistema de locomoción

Entre las opciones se incluían las ruedas, extremidades y oruga, en principio, las ruedas obtuvieron el puntaje más alto en las tablas de decisión desarrolladas en la metodología, por lo cual fueron las escogidas para el diseño, las extremidades por su parte no eran la mejor opción, ya que el suelo era mixto, el tipo de terreno no se prestaba para lo que se requería hacer, por lo que estas podrían enterrarse y desestabilizar el robot, haciendo que sea complicado maniobrar o subir pendientes. Por otro lado, la oruga puede llegar a presentar deslizamientos por el tipo de terreno, lo que dificulta el control del mismo, además otra de sus desventajas incluye su alto consumo de potencia para realizar el giro.

Por su parte, escogiendo una buena distribución de ruedas fue posible evitar los inconvenientes que presentan opciones como las extremidades y la oruga; el relieve o resalte de la banda de rodadura de la rueda genera que esta no se deslice, evitando inconvenientes para mantener la precisión durante el recorrido, en general es una opción estable en el terreno de siembra, lo que le permite tener habilidad para mantener un movimiento como el demandado. En cuanto a su mantenimiento, al presentar esta banda de rodadura sobresaliente evita que el neumático se pinche o se desgaste fácilmente, por lo que llegar a tener inconvenientes en términos de daño es poco probable. Por último, su consumo energético se limitó a dos motores que permitan mover de manera independiente las dos ruedas traseras.

#### 6.1.1.2. Configuración del robot

Una vez definidos los requerimientos y realizada la ponderación de cada una de las opciones, el resultado indicó que la disposición de ruedas de manera única permitiría tener buen desempeño del prototipo sembrador durante el recorrido, esto es precisamente porque disponer de 2 ruedas conductoras y 2 de estabilidad, le permite acomodarse correctamente a la ERA de siembra del cultivo de zanahoria, teniendo en cuenta que el ancho de ERA definido fue de 60cm. Adicionalmente su estrategia de control se realiza de manera independiente a 2 de las ruedas y su radio de curvatura está definido por el largo del robot. Al requerir de

dos motores, su costo energético no es considerado alto y de igual manera su mantenimiento no es complicado.

El triciclo, por ejemplo, no hubiese sido una buena opción a la hora de acomodarse en el terreno ya que cuenta con una rueda delantera centrada y no respetaría dicha forma de siembra, su estrategia de control se reduce a un motor por lo que el costo energético bajo y su mantenimiento es fácil, sin embargo, presenta pérdida de tracción ya que su centro de gravedad se posiciona en algunos casos en la superficie del equilibrio cuando el vehículo está en movimiento, esto genera un error al momento de estimar la posición del mismo y por ende termina complicando el control. El sistema ackerman, por su parte une en un solo eje las ruedas delanteras, su estructura mecánica y su control no son sencillas, dentro de sus ventajas tiene mínima pérdida de tracción, sin embargo, debido a la dificultad de su sistema en general, no representa alto consumo energético, pero no es de fácil mantenimiento. Por último, la disposición de ruedas omnidireccional, puede llegar a acomodarse al terreno de siembra con 4 ruedas, sin embargo, su movimiento en línea recta no se garantiza debido a sus restricciones mecánicas, se requiere un control cuya implementación es complicada. En general, sus ventajas se ven disminuídas por la dificultad mecánica y la electrónica necesarias para evitar errores a la hora de controlar el movimiento.

### **6.1.1.3. Nivel de autonomía del robot móvil**

Teniendo en cuenta que el requerimiento más importante es garantizar las distancias de siembra, el teleoperado (al ser manejado por el usuario) no permitiría garantizar dichas distancias ya que no se podría tener una velocidad constante en el desplazamiento del prototipo, lo que significa que no se avanzaría las mismas distancias y por lo cual la siembra se vería afectada. Por otro lado, el automático, aunque garantice velocidad constante y así mismo distancias constantes, no garantiza un posicionamiento preciso en el terreno afectando también la siembra, mientras que el semiautomático une la mejor parte de los dos anteriores, realiza la siembra de forma automática para garantizar las distancias y el usuario puede manejarlo para que se tenga más precisión en el posicionamiento del prototipo en el terreno.

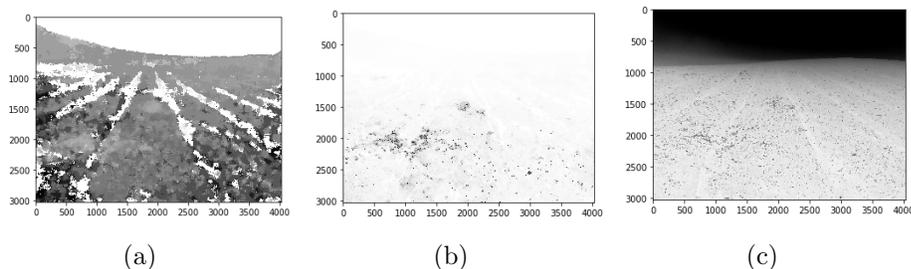
### **6.1.1.4. Sistema de navegación**

**6.1.1.4.1. Cámara** Se probó realizar unos cambios de espacio de color con el fin de poder apreciar claramente los surcos por donde se movilizaría el prototipo. Para esto, se adquirieron una serie de imágenes en los cultivos de zanahoria ubicados en Tunja-Boyacá, se utilizó una cámara de 12 MP y con una apertura focal de 1.7 (figura 6-1). Primero, se realizó el cambio de color al espacio HSV (Hue-Saturation-Value) el cual ha sido utilizado en diversos trabajos anteriores debido a que el canal H (Tono) permite generar una representación intuitiva de los colores la cual no tiene en cuenta la saturación permitiendo una mayor facilidad para diferenciar los diversos colores dentro de una imagen [Cáceres Flórez et al., 2015], [Monte-

negro, 2016], como se puede observar en la figura **6-2** es posible diferenciar los diferentes colores presentes, sin embargo, debido a las variaciones climáticas presentes en los cultivos de zanahoria como la neblina, la posición del sol, entre otros, no se puede observar completamente el camino que debe recorrer el robot ya que los colores de los diferentes objetos varían según el clima provocando que el suelo en los caminos y en los surcos tengan el mismo tono. Por otra parte, también se probaron los canales a y b del espacio de color Lab (Luminosidad, cromacidad rojo/verde y cromacidad azul/amarillo) los cuales son usados para la segmentación por color ya que representan la cromaticidad de los colores rojo/verde y azul/amarillo respectivamente, sin embargo como se puede observar en la figura **6-3** no se pueden identificar claramente los caminos debido a que estos presentan tonalidades negras al igual que los surcos y como estos espacios de color analizan los cambios de rojo a verde y de azul a amarillo no detectan claramente los cambios en los tonos negros [Jimenez et al., 2015].



**Figura 6-1.:** Imagen tomada en el terreno real de cultivo de zanahoria



**Figura 6-2.:** Imagen en el espacio de color HSV

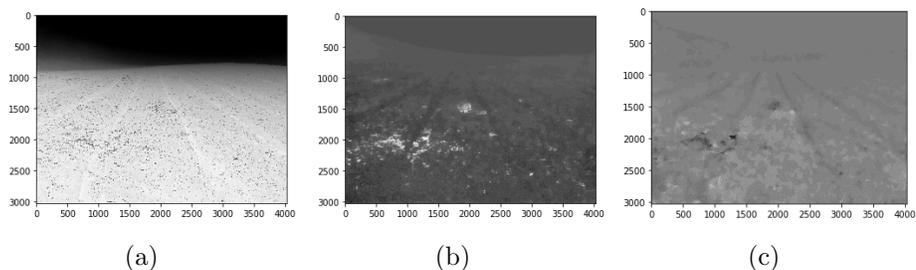


Figura 6-3.: Imagen en el espacio de color LAB

**6.1.1.4.2. Sensores ultrasónicos** El control del prototipo se basaba en el mismo que un robot seguidor de línea. En este caso, se colocaron dos sensores seguidos; uno se encontraba sobre el surco (donde se realiza la siembra) y el otro donde irían ubicadas las ruedas (figura 6-4), con el fin de que la diferencia de altura permitiera realizar el control del prototipo para que siguiera el camino correctamente.

Sin embargo, al realizar la prueba se evidenció que la altura del surco no es igual a lo largo de éste, por lo cual, a veces no se diferenciaba correctamente el surco del camino. Adicionalmente, por la presencia de irregularidades (desnivel) en el terreno también se veía afectada la lectura de los sensores ya que a veces quedaban muy pegados al suelo y era difícil definir una distancia. Por estas razones los sensores quedaron descartados, ya que el terreno no es parejo en su totalidad y se vería afectada la estabilidad del prototipo en algunos lugares y, así mismo, la siembra.



Figura 6-4.: Posicionamiento de los sensores ultrasónicos en el terreno

**6.1.1.4.3. Sistema de navegación espacial** Debido a que los anteriores sistemas de navegación se afectaron por las condiciones de la zona de prueba, se descartaron. Por lo cual, se escogió un sistema de navegación que no dependiera del clima, ni se viera afectado por la irregularidad del terreno durante el recorrido del surco. Por ello el seguidor de camino es

el sistema de navegación que se implementa, ya que al no tener como referencia la zona de siembra para hacer su recorrido (como lo tenían los anteriores sistemas), no se verá afectado y permitirá utilizarse sin importar la neblina o la irregularidad del suelo. **Sistema de control en alto nivel: seguidor de camino**

El principio de funcionamiento del seguidor de camino está basado en la posición que tiene el sistema frente a una posición deseada. Como se observa en la figura 6-5, la entrada es  $x_d$  y  $y_d$  que son los valores de  $x$  y  $y$  necesarios para ubicar el prototipo en un punto en específico; posteriormente, las señales de salida del controlador son velocidad y velocidad angular. Implementado el control la señal de salida del sistema son los valores de  $x$  y  $y$  a los que se han llegado y el valor de  $\psi$ , que es el ángulo entre la posición actual y la deseada, que se medirá con la IMU. Finalmente, el sistema es retroalimentado con los valores de salida para así obtener un error entre la posición deseada y la obtenida, con el fin de que el prototipo pueda llegar lo más preciso posible al punto calculado y poder seguir el camino de manera correcta y estable.

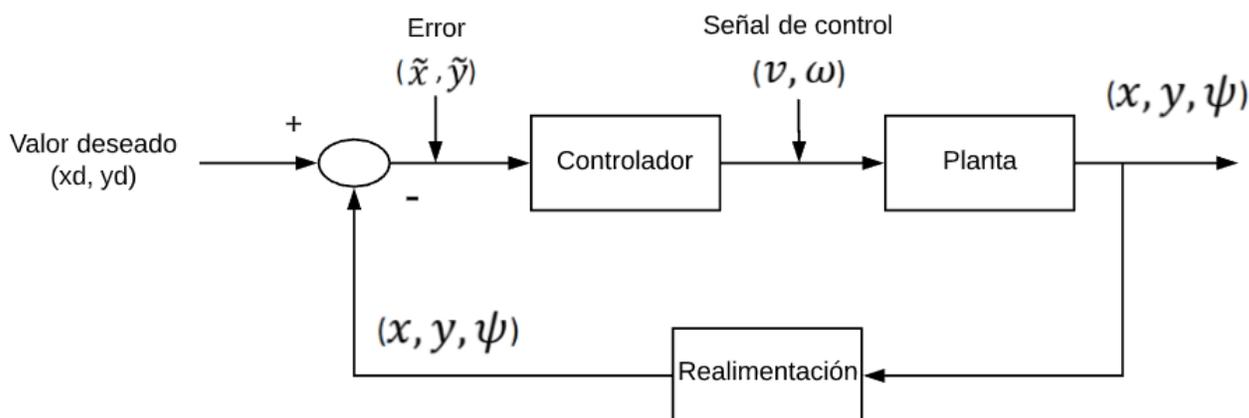


Figura 6-5.: Diagrama de bloques de la navegación del robot móvil

#### 6.1.1.5. Materiales a utilizar

Después de definir los requerimientos y de realizar la ponderación, se obtuvo que el aluminio es el material que cumple con dichos requerimientos. Esto se debe a que es un material que brinda rigidez y resistencia a golpes, pero a su vez es liviano. Mientras que el acero inoxidable, aunque soporta mejor la humedad y el calor, y sea un poco más resistente a golpes es muy pesado, adicionando el peso de los demás componentes no se cumpliría con este requerimiento, adicionalmente su manejo en elementos a pequeña escala no es tan comercial como lo es el del aluminio. El PVC, es un material liviano, comercial y que soporta muy bien la humedad y el calor, sin embargo, no es resistente a golpes fuertes y no proporciona la rigidez necesaria para soportar el peso de los demás componentes.

## **6.1.2. Sistema de siembra**

### **6.1.2.1. Método de excavación**

El método de excavación escogido fue el cincel, ya que cumplió con todos los requerimientos planteados a la hora de preparar el suelo para la siembra de la semilla, aquí se tuvo en cuenta que realizara la excavación continua y ya que son piezas firmes lo mantienen sin ningún inconveniente, además, lo hace sin llegar a invertir el suelo, mantiene una profundidad constante por la misma razón de que son fijas y compacta al mínimo el suelo.

Por otro lado, entre otras opciones se encontraban los discos y las rejas o vertederas, las cuales tienen en común que sirven para realizar la excavación a una profundidad mucho mayor que 1.5cm, lo que ya incumplía con el objetivo que es mantener las distancias de siembra y profundidad correctas. Además de otras desventajas como por ejemplo que los discos terminan compactando el suelo y lo invierten parcialmente y la reja o vertedera por su parte, lo invierte en gran proporción.

### **6.1.2.2. Método de posicionamiento y cantidad de semilla**

Entre las opciones se encontraba 'tolva-1 rodillo-orificios a la medida-mangueras', que fue la opción acertada, en primer lugar porque se cumplía con el objetivo de respetar las distancias de plantación entre semillas, adicionalmente, el sistema de rodillo o cilindro con orificios exactos y recubrimiento proponía una buena alternativa para evitar que la cantidad de semillas fuese mayor a la que se requería, al ser un rodillo continuo permitía que las semillas se depositaran al tiempo y así el consumo de energía no fuese alto.

Por otro lado, 'tolva-rodillos-orificios a la medida-mangueras' no fue una buena opción ya que al contar con varios rodillos se requería mayor consumo de energía y adicionalmente no tenía sentido poner muchos rodillos con una gran tolva cuando al final la siembra también requiere un espacio vertical entre planta y planta, por lo que se descartó. La idea de 'tolva-inyector', básicamente consistía en tener una tolva y con ayuda de la inyección se recogieran únicamente dos semillas, sin embargo, viendo la dimensión y el peso mínimo de las semillas, era muy probable que no fuesen únicamente dos semillas sino una cantidad mucho mayor. Por último, 'tolva-bandeja-método de sensado (peso deposición)', tenía el mismo inconveniente que el tema de la inyección, las semillas son tan pequeñas que era factible que cayeran más de las requeridas por su bajo peso, por lo que no resultaba ser un método confiable.

### **6.1.2.3. Método de cubrimiento de semilla**

Como lo muestra la tabla **5-16**, el barrido con escobilla fue el método con más alto puntaje en la ponderación de los métodos. Esto se debe a que permite realizar un cubrimiento superficial, sin crear terrones de suelo ni quedarse atascado, esto se debe al material de las cerdas y a que al no ser de material rígido se desliza mejor sobre el terreno. En el caso de la placa plástica al ser de un material rígido puede causar estancamiento durante el recorrido y generar un levantamiento de suelo y, así mismo, de las semillas ya posicionadas. La tira de caucho al no ser rígida permitía un mejor arrastre en el suelo y no genera estancamiento, sin embargo, no cumple con el requerimiento de cubrimiento superficial ya que realiza uno denso.

### **6.1.2.4. Materiales a utilizar**

Para definir los materiales de construcción de la tolva, se tuvo en cuenta que éstos estarán en contacto con las semillas. Por lo cual deben manejarse materiales de fácil limpieza, no corrosivos, que no desprendan material y no generen humedad. Como referencia de esto se tomaron las resoluciones 683, 4142 y 4143 de 2012 y las 834 y 835 de 2013, que mencionan los estándares que deben cumplir los materiales empleados en el manejo, almacenamiento o distribución de alimentos [Ministerio de Salud, 2012a], [Ministerio de Salud, 2012b], [Ministerio de Salud, 2012c], [Ministerio de Salud, 2013]. Teniendo en cuenta lo anterior, se definieron el acero inoxidable y el teflón como los materiales de construcción de la tolva.

### 6.1.3. Diseño final del prototipo CAD

El diseño final del prototipo en CAD se realizó en Fusion 360, luego de otros tres diseños planteados (ver anexos), en este se tuvieron en cuenta los requerimientos necesarios para el sistema de siembra y para el robot móvil, finalmente se obtuvieron los resultados más acertados para cada uno de dichos requerimientos (ver figuras 6-6, 6-7, 6-8, 6-9 y 6-10 respectivamente)(ver Anexo B).

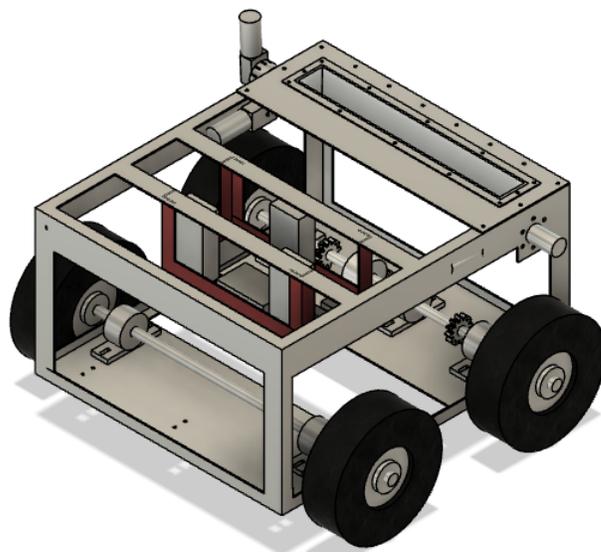


Figura 6-6.: Vista isométrica del diseño final

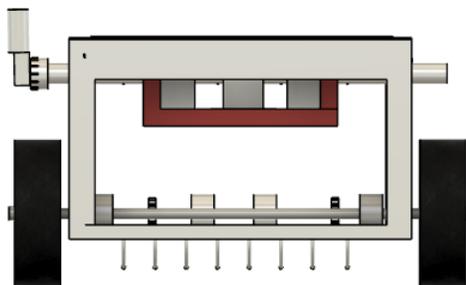


Figura 6-7.: Vista frontal del diseño final

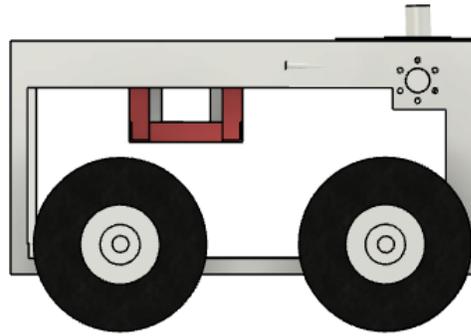


Figura 6-8.: Vista lateral del diseño final

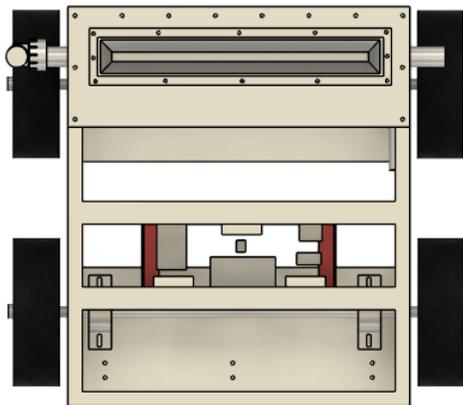


Figura 6-9.: Vista superior del diseño final

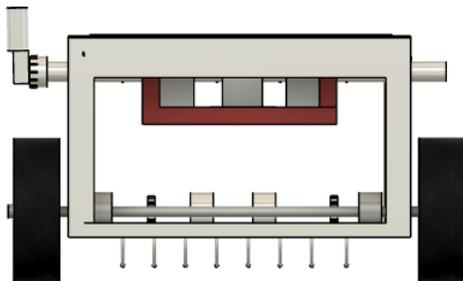


Figura 6-10.: Vista trasera del diseño final

## 6.2. Segunda etapa: Implementación del prototipo sembrador

### 6.2.1. Prototipo construído

#### 6.2.1.1. Sistema de siembra

El sistema de siembra consta de tres secciones: excavación, tolva de distribución y mangueras de posicionamiento. La tolva está compuesta por: un cilindro que posee unas perforaciones, poco profundas, que permiten recoger las semillas y las coloca posteriormetne en la manguera; un cilindro externo rodea al cilindro de distribución con el fin de mantener las semillas recogidas en los orificios en su recorrido a las mangueras de posicionamiento. La tolva se construyó primero debido a que los tamaños de los cilindros de distribución propuestos en el diseño no son tan comerciales. Por lo cual, la tolva estaría sujeta a cambios de tamaños y diámetros, y así mismo, el diseño de los lugares donde se posiciona la tolva en el prototipo (ver figuras 6-11, 6-12, 6-13 y 6-14 respectivamente).



Figura 6-11.: Vista superior del sistema de siembra



Figura 6-12.: Vista frontal del sistema de siembra



Figura 6-13.: Vista inferior del sistema de siembra

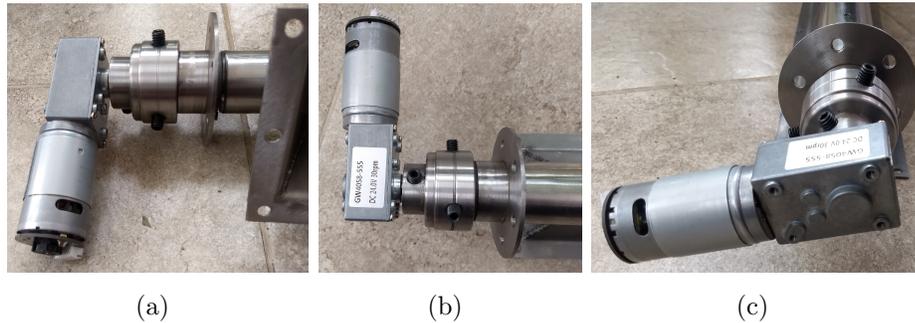


Figura 6-14.: Acople del motor en el sistema de siembra

### 6.2.1.2. Estructura del robot móvil

El robot móvil se divide básicamente en el chasis y el sistema de transmisión (figura 6-15) utilizado para realizar el recorrido de siembra, en principio, el chasis consiste en una serie de ángulos que forman un rectángulo, en sus laterales cuenta con tres láminas diagonales que brindan robustez al robot, en la parte superior cuenta con dos láminas atravesadas horizontalmente que permiten dar soporte a la caja de elementos electrónicos, posterior a estas se encuentra el sistema de siembra, en la parte inferior, hacia adelante se encuentra el soporte en el que se asegura el arreglo de cinceles y el acople de las ruedas delanteras, hacia atrás se encuentra otro soporte que sostiene el acople de las ruedas traseras e incluye los orificios por donde saldrán las semillas.

Por su parte, el sistema de transmisión utilizado consistió en inslatar al eje del motor un engranaje que permitiera por medio de una cadena llevar el movimiento al acople, el cual está sostenido con ayuda de unas chumaceras pedestal, dicho acople incluye también un engranaje del mismo tamaño para que la relación de velocidad se mantuviese 1:1. Al igual que la tolva, los acoples de los motores a las ruedas se construyeron antes que el chasis, esto precisamente para que sus diseños no estuviesen sesgados al diseño predeterminado del

mismo.



**Figura 6-15.:** Acople del motor a la rueda de control

### 6.2.1.3. Prototipo completo

En las figuras 6-16, 6-17, 6-18 y 6-19, se puede evidenciar desde diferentes planos el prototipo una vez construido. Este cuenta de manera general con los acoples del motor a la rueda, la caja con los elementos electrónicos, el sistema de siembra y un sistema de transmisión con cadena.



Figura 6-16.: Vista frontal del prototipo construido



Figura 6-17.: Vista lateral del prototipo construido

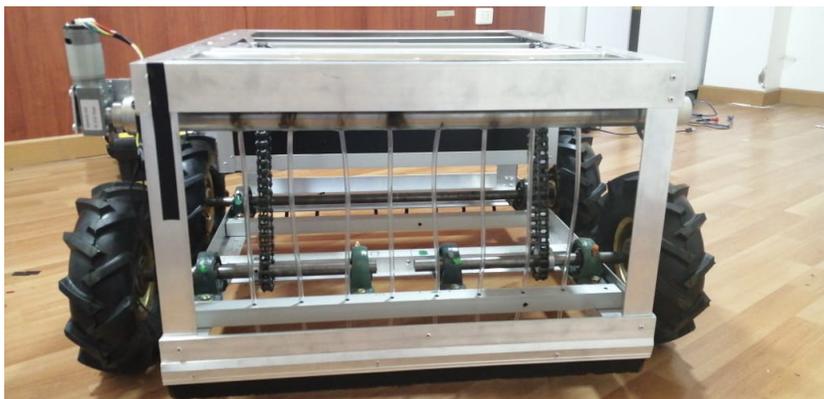


Figura 6-18.: Vista trasera del prototipo construido

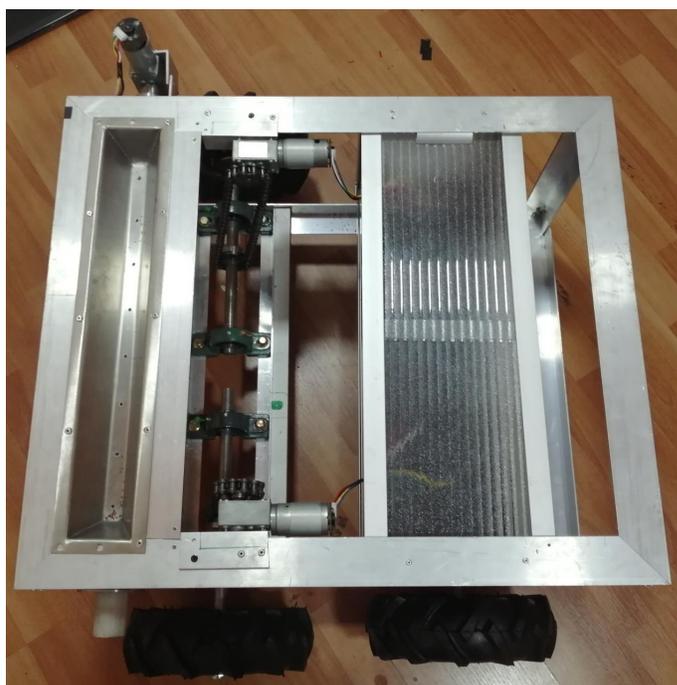
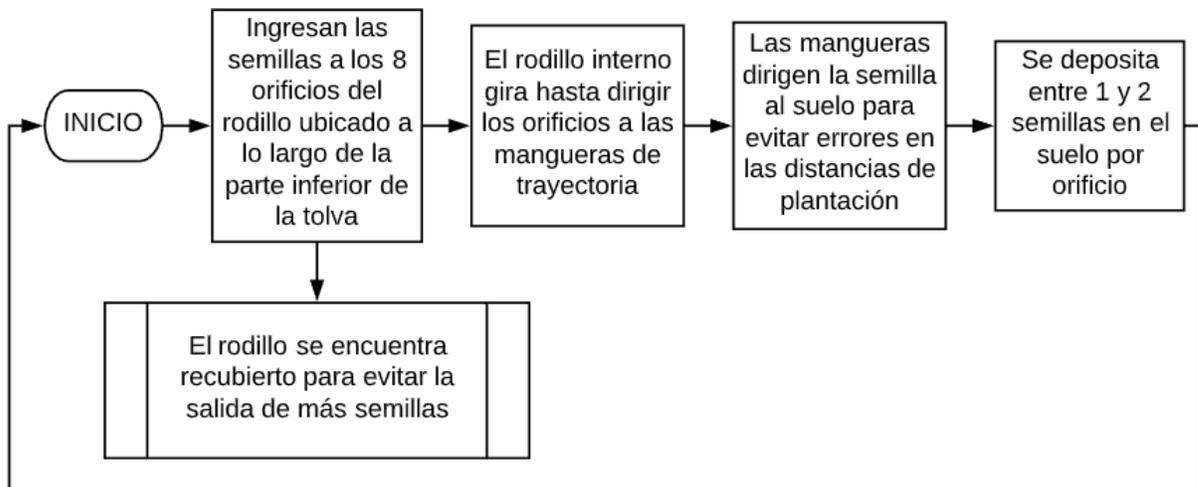


Figura 6-19.: Vista superior del prototipo construido

#### 6.2.1.4. Mecánica del sistema de siembra del robot móvil

Como se muestra en la figura 6-20, la mecánica del sistema de siembra parte del ingreso de las semillas previamente depositadas en la tolva, a partir de este momento ingresan a los orificios que tiene el rodillo que se encuentra en la parte inferior de la tolva con semillas, estos orificios cuentan con el tamaño ideal para que quepan entre 1 y 2 semillas y para asegurar dicha cantidad de semilla clasificada, se recubre el rodillo dejando espacio solo para que gire sin problema, evitando la filtración de más semillas que puedan caer al suelo y afectar la densidad de siembra. El rodillo gira a una velocidad alta (15 RPM aprox.) para garantizar

que no se recojan más semillas que las deseadas, por lo cual cuando alcanza cierto número de pulsos del encoder, significa que el rotor ya ha dado una vuelta y las semillas han sido recogidas y depositadas en los orificios donde unas mangueras aseguran la trayectoria de la semilla al lugar donde se desea depositar.



**Figura 6-20.:** Diagrama de flujo de la mecánica del sistema de siembra

## 6.2.2. Caracterización de la planta

### ■ Motor 1

Como se puede observar en la figura 6-21, la estimación de la función de transferencia realizada por el programa dio un 98.9% de similitud con respecto a los datos proporcionados. La función de transferencia de este motor es de segundo grado como se evidencia en la ecuación 6.2.2 y su respuesta ante una entrada paso se muestra en la figura 6-22.

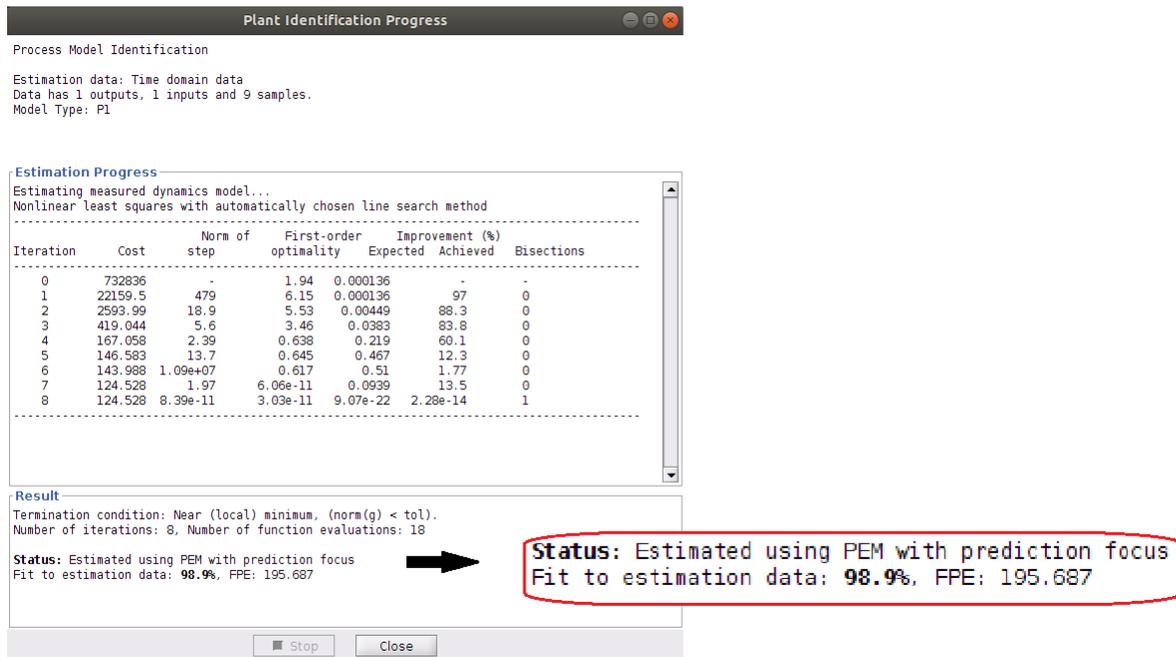


Figura 6-21.: Porcentaje de similitud de la estimación dada por PID TURNER, motor 1

$$\frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$K = 667,3$$

$$T_1 = 4,1138e - 7$$

$$T_2 = 0,001298$$

$$\frac{667,3}{5,34e - 10s^2 + 0,001298s + 1}$$

Ecuación 6.2.2 Función de transferencia motor 1

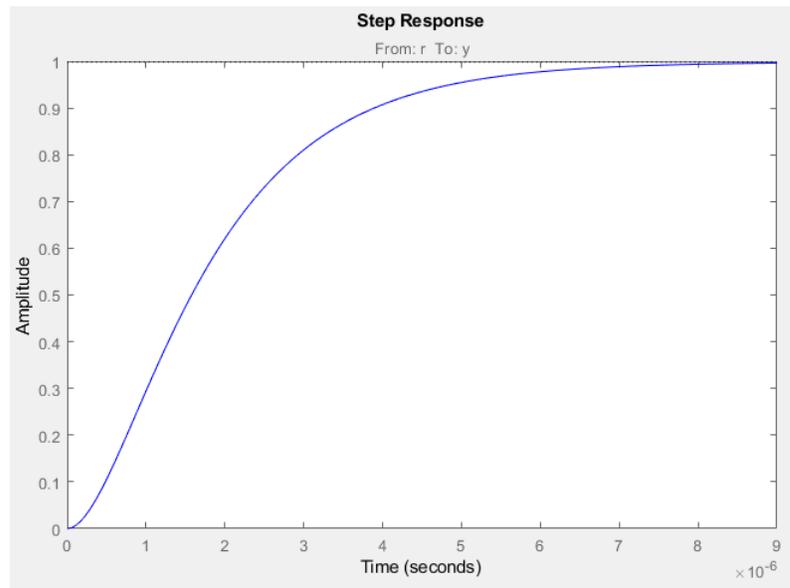


Figura 6-22.: Respuesta ante una entrada paso del motor 1

### ■ Motor 2

Por otro lado, la figura 6-23 muestra que la estimación de la función de transferencia realizada por el programa dio un 97.26% de similitud con respecto a los datos proporcionados. La función de transferencia de este motor es de segundo grado como se evidencia en la ecuación 6.2.2) y su respuesta ante una entrada paso se muestra en la figura 6-24.

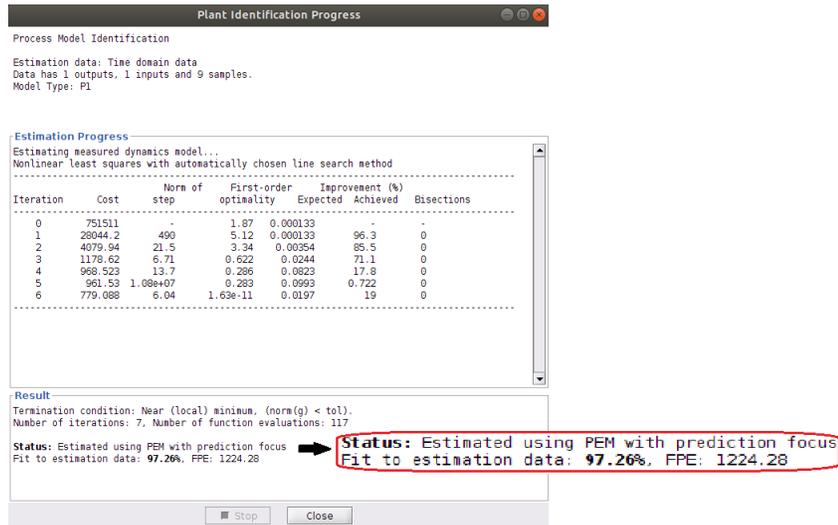


Figura 6-23.: Porcentaje de similitud de la estimación dada por PID TURNER, motor 2

$$\frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$K = 676,3$$

$$T_1 = 2,9489e - 7$$

$$T_2 = 0,001493$$

$$\frac{676,3}{4,403e - 13s^2 + 0,001493s + 1}$$

Ecuación 6.2.2 Función de transferencia motor 2

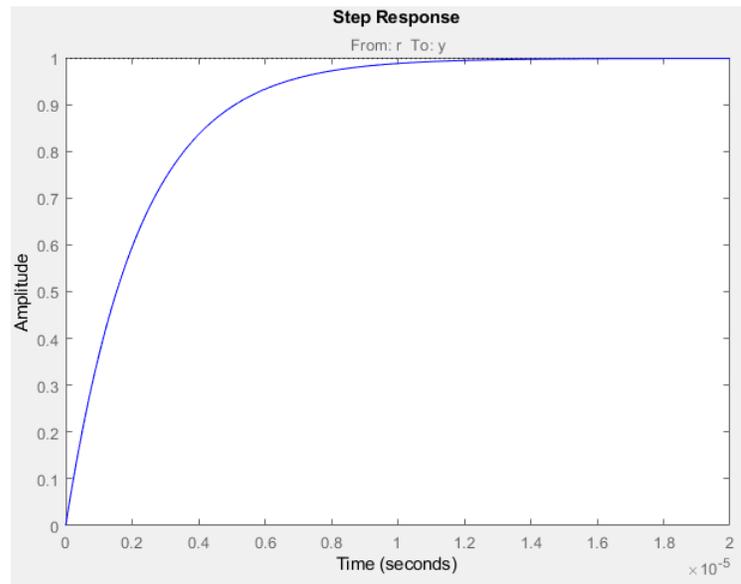


Figura 6-24.: Respuesta ante una entrada paso del motor 2

#### ■ Motor sistema de siembra

Por último, en la figura 6-25 se puede observar que la estimación de la función de transferencia realizada por el programa dio un 97.1% de similitud con respecto a los datos proporcionados. La función de transferencia de este motor es de primer grado como se evidencia en la ecuación 6.2.2.

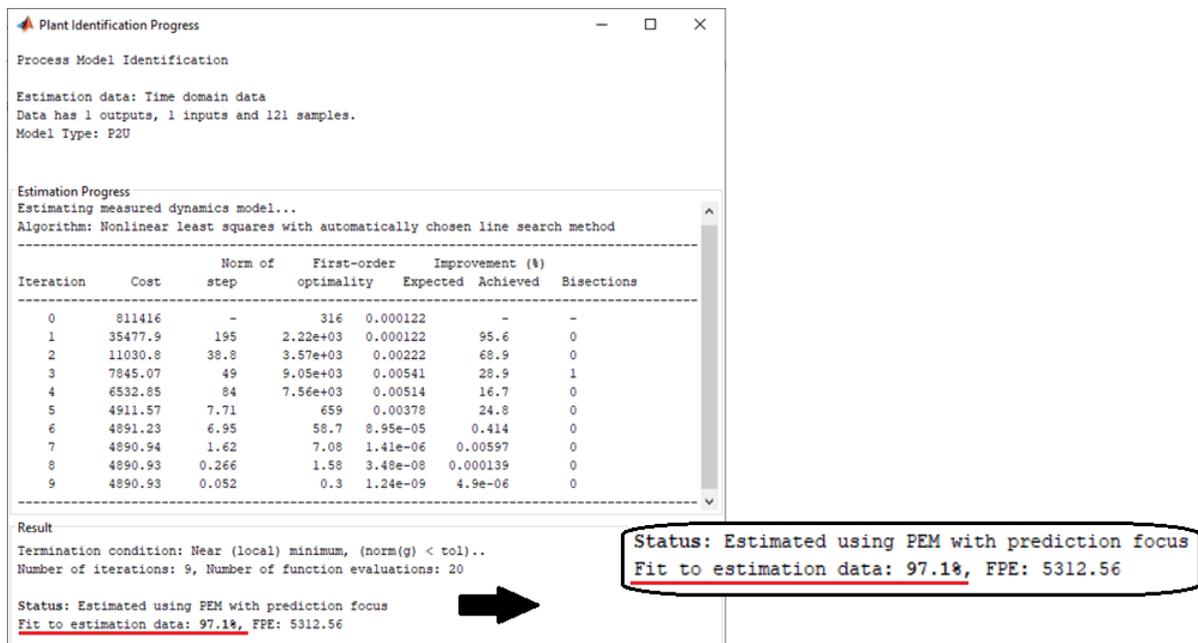


Figura 6-25.: Porcentaje de similitud de la estimación dada por PID TURNER, motor del sistema de siembra

$$\frac{K}{(T_1s + 1)}$$

$$K = 942$$

$$T_1 = 15,99$$

$$\frac{942}{15,99s + 1}$$

Ecuación 6.2.2 Función de transferencia motor del sistema de siembra

### 6.2.3. Sistema de navegación del prototipo

El funcionamiento general del sistema de navegación implementado, comienza con el recibimiento de los datos de los sensores: IMU y la velocidad calculada a partir de los datos del encoder que posee cada uno de los motores. Posteriormente, dicha información se convertirá en una sola velocidad (ecuación 6.2.3) que ingresará al control de alto nivel para calcular las velocidades deseadas a las cuales deben ir los motores para alcanzar el punto deseado (proceso explicado en la metodología). Cuando se obtienen las velocidades deseadas deben dividirse de forma que cada motor tenga la velocidad a la que debe ir (ecuación 6.2.3), para que después el control PID de cada motor genere una señal de control para éstos. Por lo cual el sistema de navegación comprende al prototipo de dos formas: el control de alto nivel lo comprende en su totalidad, es decir, siendo la planta el prototipo completo, mientras que el control de bajo nivel toma como planta a cada uno de los motores.

$$v = R \cdot \frac{v_r + v_l}{2}$$

Ecuación 6.2.3 Velocidad lineal del robot

$$V_r = v_d + \frac{\omega_d \cdot 0,13}{2}$$

$$V_l = v_d - \frac{\omega_d \cdot 0,13}{2}$$

Ecuación 6.2.3 Definición de la velocidad deseada para cada motor

Es importante resaltar que el sistema de navegación implementado no contempla la reubicación del prototipo entre ERA y ERA, ya que por la situación actual varios de los procesos de

importación de materiales utilizados se retrasaron y así mismo la construcción del prototipo, por lo tanto, el tiempo para terminar el proyecto fue más corto y no se alcanzó a implementar un método para la ubicación del prototipo en la siguiente ERA. Por lo cual, al terminar una el usuario deberá ubicarlo al principio de la siguiente ERA que debe recorrer. Una solución a esto se contempla dentro de la sección 'Recomendaciones' del documento, indicando el uso de un control remoto para evitar dicha labor.

### 6.2.3.1. Control de alto nivel

La figura 6-26 muestra una simulación del control de alto nivel implementado, el camino deseado y el camino hecho por el robot. Para esta simulación se utiliza la función 'TURTLE-SIM' de ROS que permite implementar un controlador para una tortuga que representará al robot y el comportamiento que tendrá con dicho controlador. Cabe resaltar que en la simulación la tortuga no comienza su trayectoria desde el punto (0,0) del camino como sí lo hace el prototipo sembrador en un cultivo, ya que su punto de partida es el comienzo del surco, es decir, el punto (0,0) del camino a recorrer (ver Anexo C).



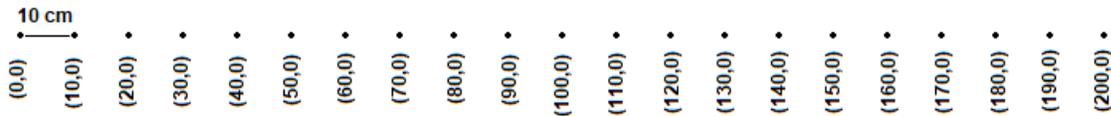
Figura 6-26.: Simulación del controlador con función Turtlesim de ROS

La tabla 6-9 muestra las características del seguidor de camino implementado. La velocidad máxima fue encontrada observando la respuesta del sistema a diferentes velocidades, comenzando por la calculada por el controlador y a partir de ésta se comenzó a limitar su valor máximo para determinar la velocidad con la cual el prototipo pudiera tener un error de posición mínimo; se cronometró el tiempo que tarda en ir de un punto al siguiente y finalmente, durante el recorrido se fueron calculando el error de posición en cada punto

de referencia para posteriormente calcular el error del seguidor de camino con el KTE. El camino consta de 20 posiciones, teniendo como punto de inicio la posición (0,0); cada punto está separado a 10 cm del otro (ver figura 6-27), ya que hay una distancia de 5 cm entre el eje de las ruedas y las mangueras de posicionamiento de las semillas, por lo cual debe avanzar 2 cm más para completar los 7cm deseados, dando una distancia de 9 cm, sin embargo, se adicionó un centímetro demás ya que se debe tener en cuenta que el error de posición del carro no llega a cero y por lo cual su error mínimo es de 1 cm aproximadamente.

**Tabla 6-1.:** *Características del seguidor de camino*

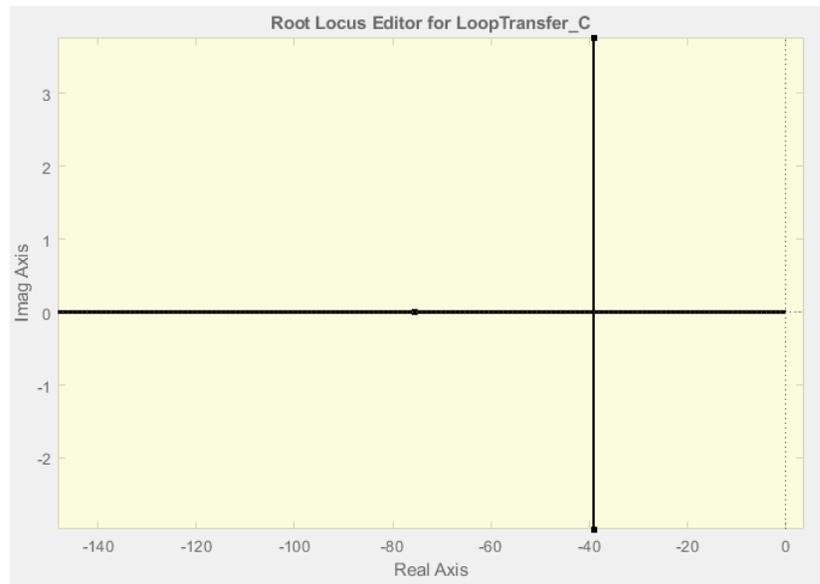
Cacterísticas	
Velocidad máxima	0.075 m/s
Tiempo para alcanzar el siguiente punto	3 s
KTE	0.007



**Figura 6-27.:** Camino recorrido por el prototipo

### 6.2.3.2. Control de bajo nivel

Para el diseño del control de bajo nivel se estableció un % de sobrepico del 0% y un tiempo de establecimiento de 100 ms, ya que el sistema debe estabilizarse rápidamente para no afectar la precisión de la siembra, y así mismo, tampoco puede tener un sobrepico que pueda afectar la siembra. Utilizando la función 'SISOTOOL', se visualizó la región de diseño del control (figura 6-28). Teniendo en cuenta que ambos motores son estables un control proporcional, aunque es suficiente para cumplir con los requerimientos, es muy inestable y se debe tener en cuenta las características de la zona de prueba que por las irregularidades del suelo, el control tendrá perturbaciones constantes un control proporcional no sería suficiente para mantener el sistema estable; por otro lado, el controlador PI aunque es más estable frente a perturbaciones tiene una desventaja y es que genera oscilaciones [Hidalgo, 2015], que pueden afectar la estabilidad en el recorrido y por tanto, la siembra. Por lo cual, para garantizar las velocidades y estabilidad en los motores, y por lo tanto la siembra, se opta por un controlador PID que al agregar una parte derivativa se reducen las oscilaciones.



**Figura 6-28.:** Control proporcional-integral motor2

### 6.2.3.3. Sintonización con Algoritmo Genético

La tabla **6-2** muestra los resultados de la evaluación con MBF de los diferentes parámetros de entrada tomados de los cuatro trabajos de referencia ([Colorado Arellano Othon, 2018], [Andri Mirzal, 2014], [Mostafa, 2013], [J.M.Herrero, 2005]). Dando como resultado, que 40 generaciones y 400 individuos permiten obtener individuos con el mejor desempeño, es decir con el menor error en la función de coste (ver Anexo D).

**Tabla 6-2.:** Resultados de la evaluación a través de MBF para establecer parámetros de entrada algoritmo genético

Artículo	# Generaciones	# Individuos	MBF Motor 1	MBF Motor 2
1	20	200	2.89e-6	3.23e-6
2	80	1000	8.92e-7	9.35e-7
3	1000	10	5.56e-7	5.87e-7
4	40	400	3.75e-7	3.42e-7

La tabla **6-3** muestra los parámetros utilizados en el Algoritmo genético para la sintonización del PID

**Tabla 6-3.:** *Parámetros del algoritmo genético*

Parámetros	Valor
Número de Generaciones	40
Número de Individuos	400
Valor Min. cromosoma	0
Valor Max. cromosoma	100

### Valores de las constantes del PID determinadas por el Algoritmo Genético

Las tablas 6-4, 6-5 muestran las constantes del controlador PID implementado para cada motor y el error (ITAE) obtenido con dichas constantes. Por otro lado, las figuras 6-29 y 6-30 muestran la respuesta ante una entrada paso con el controlador PID implementado en cada motor.

**Tabla 6-4.:** *Valores de las constantes del PID motor 1*

Kp	Kd	Ki	ITAE
20	5	74	2.92 e-7

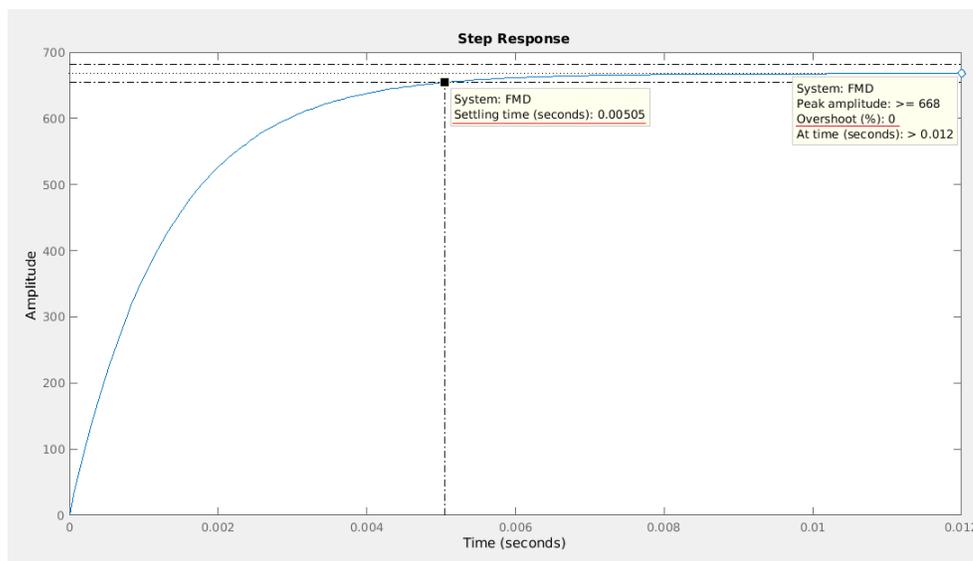
**Figura 6-29.:** Respuesta ante una entrada paso del motor 1 con control PID implementado

Tabla 6-5.: Valores de las constantes del PID motor 2

<b>Kp</b>	<b>Kd</b>	<b>Ki</b>	<b>ITAE</b>
15	2	96	3.48 e-7

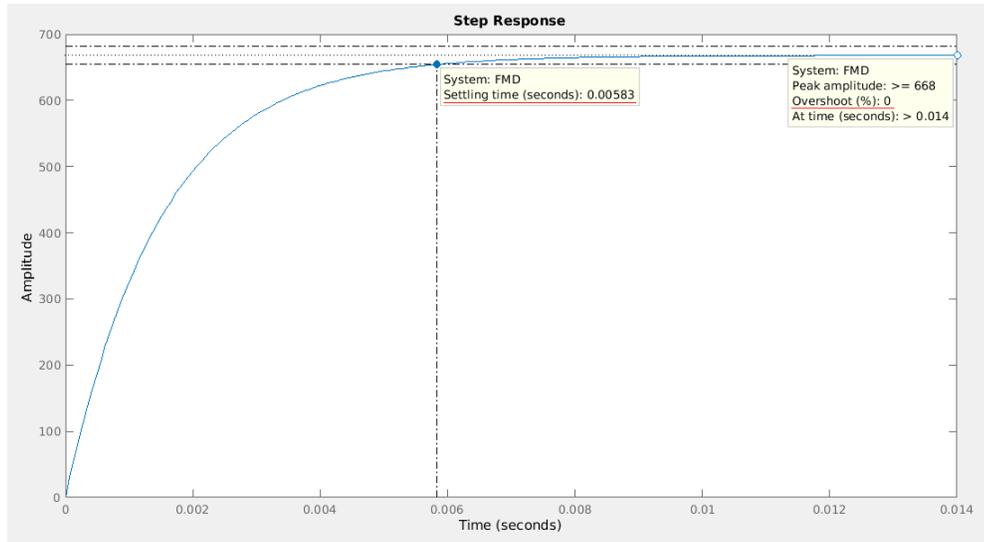


Figura 6-30.: Respuesta ante una entrada paso del motor 2 con control PID implementado

## 6.3. Tercera etapa: Evaluación del prototipo sembrador

### 6.3.1. Funcionamiento del prototipo

La figura 6-31 muestra el funcionamiento del prototipo, el proceso comienza avanzando al primer punto deseado, si no se ha llegado a dicho punto el prototipo debe seguir avanzando, de lo contrario se detiene y el motor de la tolva se activa para rotar y colocar las semillas en las mangueras que depositan las semillas en el suelo, al finalizar la siembra se envía una señal a los motores para que sigan avanzando a la siguiente posición.

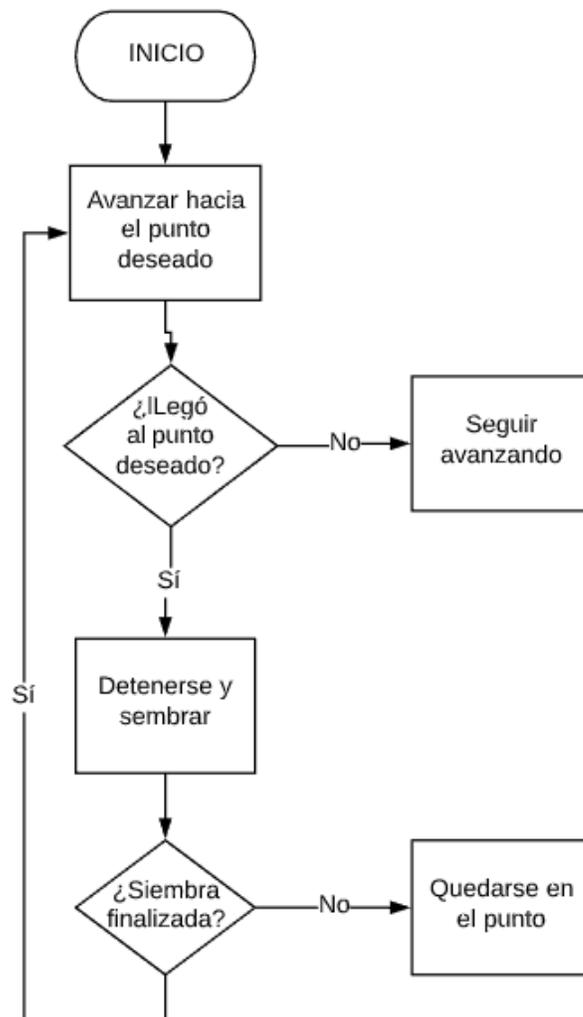


Figura 6-31.: Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo

A continuación se muestra una aproximación de lo que tarda el prototipo en sembrar una hectarea. Primero se debe tener en cuenta la autonomía del prototipo para saber cuánto alcanza a recorrer hasta que sea necesario cargarlo. Para esto se debe tener en cuenta el consumo de corriente que tiene cada motor y las características de la batería que lo alimentan, ver tabla 6-6.

**Tabla 6-6.:** *Consumo energético de los motores*

<b>Motor</b>	<b>Consumo en A de motores</b>	<b>Caract. Batería</b>
Motor 1	1.38	4200 mAh
Motor 2	1.40	5200 mAh
Motor tolva	1.50	5200 mAh

Teniendo en cuenta la tabla anterior la autonomía del robot está definida por el consumo del motor de la tolva ya que es el que está alimentado por la batería con menos mAh. Por lo cual se realiza el siguiente cálculo para saber la autonomía de la batería con dicho consumo energético (ecuación 6-1).

$$Autonomia = \frac{4,2Ah}{1,38A} = 3,04h \quad (6-1)$$

Ecuación 6-1 Autonomía del prototipo

Teniendo en cuenta lo anterior, el robot tiene entonces una autonomía de 3 horas. Ahora se debe calcular la distancia que alcanza a recorrer en dicho tiempo. Para ello, se tiene en cuenta que cada 5 segundos recorre 10 cm, entonces se realiza una regla de tres para saber cuánta distancia recorre en el tiempo de autonomía (ecuación 6.3.1).

$$0,1 \text{ m} \rightarrow 5 \text{ s}$$

$$x \rightarrow 10800 \text{ s}$$

$$x = 216 \text{ metros}$$

Ecuación 6.3.1 Distancia que se recorre en el tiempo de autonomía del prototipo

Para saber el tiempo que demora el prototipo en recorrer una hectarea se realiza el siguiente cálculo. Primero, debe tenerse en cuenta el tiempo muerto o el tiempo que demoran en cargar las baterías para que el prototipo se vuelva a poner en funcionamiento, con los cargadores comerciales se tiene un tiempo de carga de 3 horas [Extremo, 2018], por lo cual de las 12 horas de trabajo de un cultivador, el prototipo estará en movimiento 6 horas, es decir, se

recorrerán 432 m por día. Ahora, sabiendo que 1 hectarea son 10000  $m^2$ , posteriormente, se sacó la raíz cuadrada del área en  $m^2$  para saber el largo y ancho de ésta y facilitar los cálculos .

$$\sqrt{10000 m^2} = 100 m \quad (6-2)$$

Ecuación 6-2 Largo y ancho de un área de 10000  $m^2$

Teniendo en cuenta que los surcos son de 60 cm de ancho (100 m de largo), y que las canales por las que se transita son de 10 cm aproximadamente, es decir 80 cm en total, se procedió a saber cuánto surcos caben a lo ancho del área de siembra (100 m).

$$\frac{100 m}{0,8 m} = 125 \text{ surcos} \quad (6-3)$$

Ecuación 6-3 Cantidad de surcos en el terreno

Sabiendo la cantidad de surcos que hay en el área de siembra, se debe calcular la distancia final que se debe recorrer. Por lo cual se multiplica el largo de un surco por la cantidad hallada anteriormente.

$$100 m \cdot 125 = 12500 m \quad (6-4)$$

Ecuación 6-4 Distancia final a recorrer

Teniendo en cuenta que por día (24 h) se recorren 432 m, es necesario saber cuánto demora en realizar los 12500 m (ecuación 6.3.1).

$$432 m \rightarrow 1 \text{ dia}$$

$$12500 m \rightarrow x$$

$$x = 28,9 \text{ dias}$$

Ecuación 6.3.1 Tiempo que tarda el prototipo en recorrer una hectarea

En comparación con los tiempos requeridos para los tipos de siembra convencionales obtenidos a partir de la información adquirida en las entrevistas y visitas realizadas, en donde se conoció el tiempo que demoran los agricultores en sembrar al voleo las 6 hectareas que tienen, ya que en promedio 4 personas se demoran 10 horas aproximadamente realizando la siembra de esta forma, es decir, que **cada persona siembra 1.5 ha en dichas horas al voleo**. Adicionalmente, algunos de ellos habían manejado los otros tipos de siembra (que dejaron de usar en su momento priorizando el tiempo sobre la densidad de siembra) y por lo cual dieron a conocer que las siembras que se realizan en línea continua y a golpes requieren más personas para que se pueda realizar a la luz del día, siendo entre 6-7 (respectivamente)

personas realizando dicha labor, por lo cual **cada persona sembraría 1 ha aproximadamente en línea continua y 0.85 ha para el caso de siembra a golpes para cubrir el espacio requerido de siembra.**

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a calcular cuánto se demora una persona sembrando una hectarea en los tipos de siembra convencionales, como se muestra en las ecuaciones 6.3.1 y 6.3.1 respectivamente.

$$1,5 \text{ ha} \rightarrow 10 \text{ horas}$$

$$1 \text{ ha} \rightarrow x$$

$$x = \mathbf{6.66 \text{ horas sembrando al voleo}}$$

Ecuación 6.3.1 Tiempo que tarda una persona en sembrar al voleo una hectarea

$$1 \text{ ha} \rightarrow 10 \text{ horas}$$

$$1 \text{ ha} \rightarrow x$$

$$x = \mathbf{10 \text{ horas sembrando en línea continua}}$$

Ecuación 6.3.1 Tiempo que tarda una persona en sembrar en línea continua una hectarea

$$0,85 \text{ ha} \rightarrow 10 \text{ horas}$$

$$1 \text{ ha} \rightarrow x$$

$$x = \mathbf{11.7 \text{ horas sembrando a golpes}}$$

Ecuación 6.3.1 Tiempo que tarda una persona en sembrar a golpes una hectarea

### **6.3.2. Estrategia de control**

Para evaluar la estabilidad del prototipo se realizó una simulación de obstáculos en el recorrido colocando objetos a lo largo de éste, como lo muestra la figura **6-32**. Dichos obstáculos se ubicaron en puntos críticos del camino, por ejemplo, un punto de llegada del prototipo, como se puede observar en la figura **6-33**, éste para en el punto deseado aún cuando está el obstáculo. También se evaluó el caso en el cual el prototipo tendría que superar un desnivel con pendiente en su camino, uno de los obstáculos colocados en el recorrido tenía dicha característica, dando como resultado que el prototipo es capaz de superar pequeñas pendientes, sin embargo, si el punto de llegada es el final de la pendiente por el peso del

mismo la sobrepasará y no quedará en el punto exacto. Por otro lado, se contempla el caso en el cual se quede estancado a lo largo de su recorrido aún cuando no se pudo encontrar una forma para poder simular dicha situación. Sin embargo, por el peso del prototipo, se puede suponer que si el estancamiento es de una profundidad que abarque toda una rueda (diámetro de 26 cm) éste no podrá salir por sí mismo y el usuario tendrá que levantarlo y reubicarlo en el camino.



**Figura 6-32.:** Simulación de camino con obstáculos

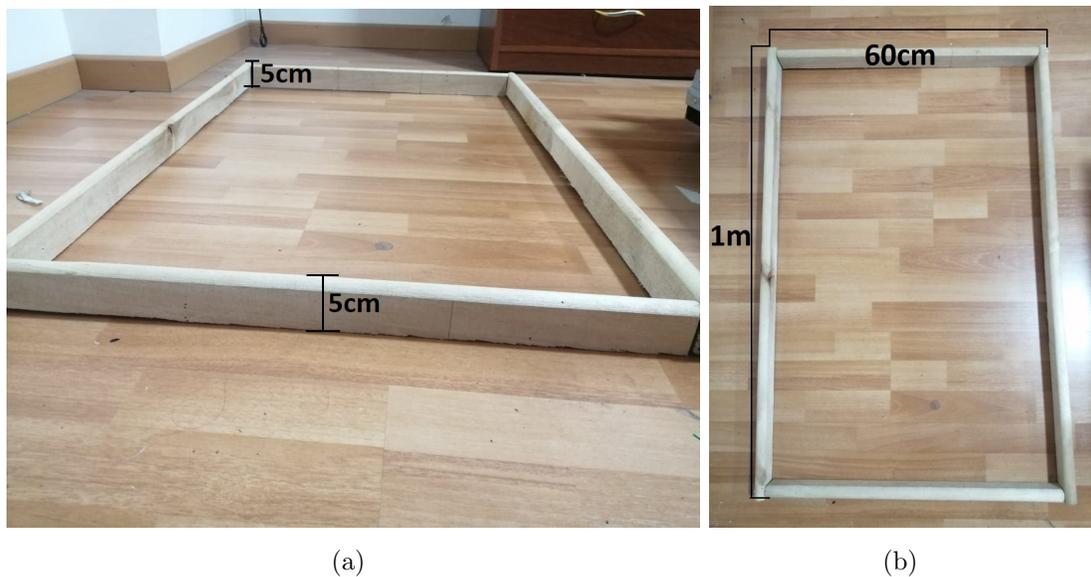


**Figura 6-33.:** Respuesta del prototipo a obstáculos

### 6.3.3. Sistema de siembra

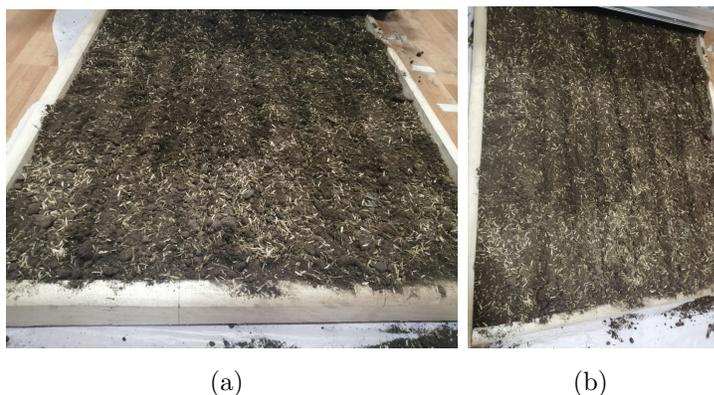
Para realizar la evaluación del sistema de siembra se construyó un rectángulo con madera (figura 6-34), con 5cm de alto (esta medida se definió a partir de las entrevistas realizadas a

los cultivadores, pues en su mayoría lo realizan a la misma altura), 60cm de ancho (este valor varía entre 40cm y 1,20m, pues según lo comentado, depende de la capacidad que tengan para acomodarlo y adicionalmente de cómo deseen organizar su terreno para la siembra, ya que la máquina utilizada para dicho fin, permite variarlo a comodidad y gusto del cultivador) y 1m de largo (debido al espacio con el que se disponía para la prueba). Ya que el dispositivo está diseñado para realizar la siembra en ERAS, se diseña de tal manera que la simule una vez se ingresa el sustrato, esta presenta las medidas requeridas para la siembra de zanahoria, que se tuvieron en cuenta también para el diseño de la estructura del robot, permitiendo el paso del mismo a través de esta.



**Figura 6-34.:** Simulación de ERA

Una vez se ingresa el sustrato en el arreglo de madera que permite simular una ERA, se acomoda el robot de tal manera que el cincel del carro ingrese en el suelo y este pueda avanzar sin problema. Como se puede observar en la figura **6-35** el recorrido es continuo, por lo que la forma de disposición de semilla puede llegar a parecerse al sistema de siembra tradicional 'en línea continua', sin embargo, a pesar de que se realiza una línea continua con el cincel para asegurar que la semilla de tamaño pequeño quede a la profundidad requerida (ver figura **6-36**), se dispone cada cierto espacio como sucede en el sistema de siembra 'a golpes', esto con la finalidad de mantener la cantidad y las distancias deseadas. Posteriormente esta es cubierta con un sistema de barrido suave por la escobilla ubicada en la parte posterior del robot para evitar movimientos en la semilla y compactación en el suelo, ya que esto puede hacer que no germine o se desarrolle correctamente.



**Figura 6-35.:** Líneas continuas realizadas por el cincel del robot



**Figura 6-36.:** Profundidad realizada por el cincel del prototipo

Debido a que el sustrato cuenta con fibras y adicionalmente la semilla tiene un tamaño muy pequeño, no es muy clara su visualización en el suelo, por ello, se decidió realizar una prueba en una superficie blanca que permitiera mostrar de manera clara tanto las distancias (figura 6-41), como la cantidad de semilla por siembra (ver figura 6-37).



**Figura 6-37.:** Cantidad de semilla distribuida

**Tabla 6-7.:** Resultados prueba de siembra

Semilla dispuesta	Cantidad de siembras en la prueba	Cantidad de semilla utilizada
1	0	0
2	42	84
3	38	114
TOTAL	80 siembras	198 semillas

Como se puede observar en la tabla 6-7, se obtuvieron 42 siembras con 2 y 38 con 3 semillas respectivamente, lo esperado era que la cantidad de siembra fuese entre una y dos semillas, sin embargo, por temas de construcción se utilizó una broca con medida comercial, lo que no hizo exacto el tamaño del orificio del rodillo que llevaba la semilla de la tolva a las mangueras de trayecto, por lo que se tuvo que aumentar la velocidad de giro del rodillo para reducir la posibilidad de que más semillas fueran depositadas y por lo cual se tuvieron siembras con 3 semillas, lo que sigue siendo una cantidad considerable, y adicionalmente

debido al aumento del tamaño del orificio y de la velocidad algunas de las semillas que no se posicionan correctamente en el orificio se dañan ya que quedan atrapadas entre el rodillo y su cubrimiento. En el total del área de siembra que corresponde a  $0.45 \text{ m}^2$ , se realizaron 80 siembras y se depositaron un total de 198 semillas con una de pérdida de 24 semillas por rompimiento de la misma, es decir, un 12%, a partir de esto se hace una relación para encontrar el número de siembras y la respectiva cantidad de semillas aproximadas a utilizar en 1 hectárea ( $10.000 \text{ m}^2$ ), sumando también esta pérdida de semilla, como se muestra en las ecuaciones 6-5 y 6-6 respectivamente.

$$\frac{10,000 \text{ m}^2 * 80}{0,45 \text{ m}^2} = 1'777,777 \text{ Sitios de siembra/ha} \quad (6-5)$$

Ecuación 6-5 Sitios de siembra por hectárea

$$\frac{10,000 \text{ m}^2 * 198}{0,45 \text{ m}^2} + 12\% = 4'928,000 \text{ Semillas/ha} \quad (6-6)$$

Ecuación 6-6 Cantidad de semillas por hectárea

Debido a que el peso aproximado de la semilla es de  $0.001 \text{ g}$  [MARTÍNEZ, 2016], se multiplica la cantidad de semillas que depositaría el robot por hectárea por este peso y se obtiene un valor en gramos, se realiza la conversión y se obtiene finalmente que el total de semilla utilizada por el prototipo es aproximadamente de  $4.9 \text{ Kg/ha}$ , como se muestra en la ecuación. 6-7.

$$\frac{4'928,000 \text{ semillas} * 0,001 \text{ g}}{1000} = 4,9 \text{ Kg de semilla/ha} \quad (6-7)$$

Ecuación 6-7 Kilogramos de semilla en una hectárea

Teniendo en cuenta las relaciones realizadas anteriormente, la cantidad de semilla aproximada a utilizar por el prototipo fue de un total de  $4.9 \text{ Kg}$  de semilla por hectárea con  $1'777.777$  sitios de siembra, frente a la densidad de siembra convencional mayormente utilizada por los cultivadores 'al voleo', que utiliza  $5.5 \text{ Kg}$  por hectárea con  $600.000$  sitios de siembra, esto quiere decir que el prototipo reduce en un 11% la cantidad de semilla utilizada en esta forma de siembra.

Adicionalmente, otra de las ventajas que tiene el prototipo, es que aprovecha en mayor porcentaje el área de siembra, como se puede observar en la Figura **6-38**, ya que teniendo en cuenta que el espacio entre los 8 orificios que direccionan la semilla es de  $49 \text{ cm}$ , esto define el área de siembra utilizada y el espacio que ocupan las ruedas junto con el espacio muerto que hay entre la parte interna de las ruedas y los orificios que se encuentran a los extremos, define el área sin siembra que es de  $32 \text{ cm}$ , para un total de  $81 \text{ cm}$  utilizados por el prototipo; en comparación con el porcentaje de área de siembra utilizado en los tipos de siembra convencionales, los cuales disminuyen el porcentaje aprovechable por dos razones

principales, en primer lugar, ya que ellos requieren del espacio por el que la persona realiza la siembra y en segundo lugar, debido a que ninguno de los 3 tipos es exacto, en la siembra al voleo se tiende a poner las semillas en forma de abanico pero tratando de no dejarlas en los extremos de las ERA (ver figura 6-39) y en la siembra en línea continua y a golpes a pesar de querer mantener un distanciamiento horizontal, sigue siendo un espacio definido empíricamente, por lo que no se aprovecha al máximo el ancho de la ERA, como se puede observar en la figura 6-40.

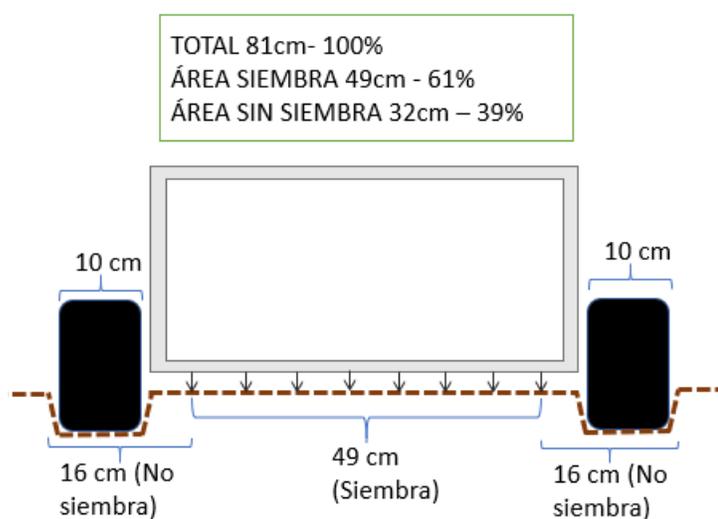


Figura 6-38.: Área de siembra del robot

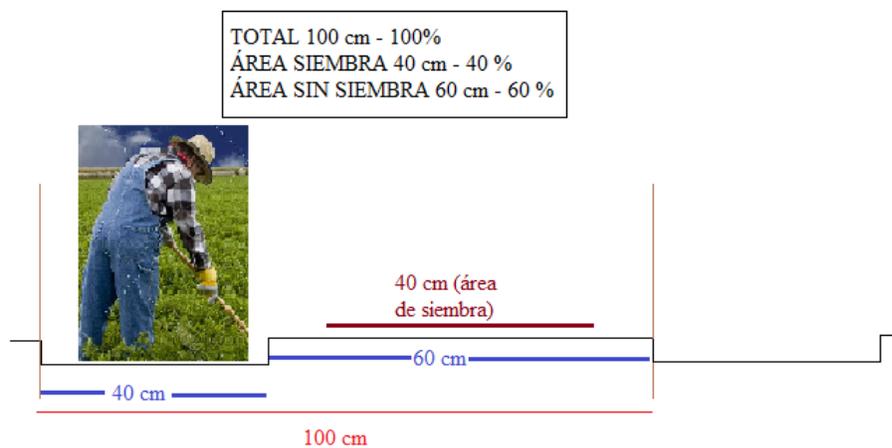


Figura 6-39.: Área de siembra al voleo

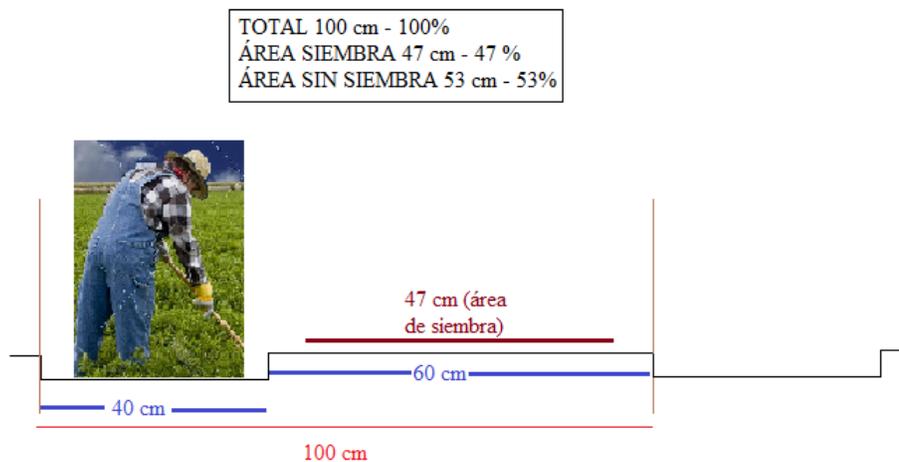


Figura 6-40.: Área de siembra al chorrillo y golpe

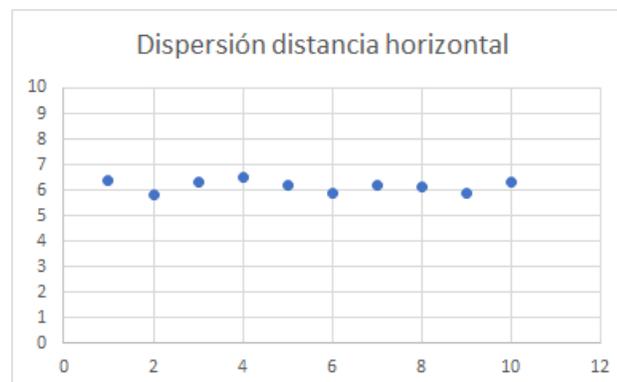
La figura 6-41 muestra las distancias de plantación realizada por el prototipo en una de las siembras. Para conocer el promedio de las distancias realizadas por el prototipo se tomaron las distancias de 10 siembras escogidas de forma aleatoria y posteriormente se realiza el promedio entre éstas (ver tabla 6-8).

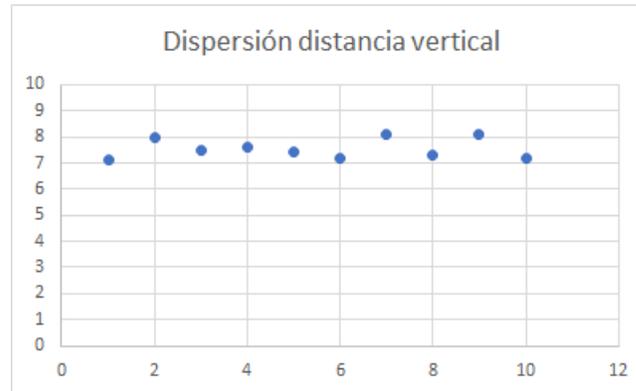


Figura 6-41.: Distancias de plantación

**Tabla 6-8.:** *Distancias verticales y horizontales de 10 siembras escogidas aleatoriamente*

Siembra	Distancia Horizontal (cm)	Distancia Vertical (cm)
1	6,4	7,1
2	5,8	8,0
3	6,3	7,5
4	6,5	7,6
5	6,2	7,4
6	5,9	7,2
7	6,2	8,1
8	6,1	7,3
9	5,9	8,1
10	6,3	7,2
<b>Promedio distancia</b>	6,16	7,55
<b>Varianza</b>	0.054	0.149
<b>Desviación estándar</b>	0.232	0.387

**Figura 6-42.:** Diagrama de dispersión de las distancias horizontales tomadas



**Figura 6-43.:** Diagrama de dispersión de las distancias verticales tomadas

Como se muestra en la tabla anterior anterior el promedio de distancia de siembra es de 6,16 cm horizontalmente y 7,55 verticalmente. La distancia horizontal se ve afectada por la construcción del prototipo debido a que no se realizaron las medidas exactas propuestas y adicionalmente las mangueras que depositan las semillas tienden a doblarse a un lado disminuyendo más dicha distancia. Sin embargo, el promedio de siembra horizontal de la zanahoria se encuentra dentro de los rangos esperados y el horizontal no sobrepasa un centímetro de diferencia, respecto a los valores mencionados en el marco teórico.

De igual forma, es posible observar tanto de las distancias horizontales como de las verticales que la varianza y desviación estándar tienen valores muy cercanos a cero, lo que quiere decir que en realidad los datos no cambian de manera abrupta unos entre otros, lo que también se puede evidenciar en los diagramas de dispersión de las distancias de plantación (Figuras 6-42 y 6-43 respectivamente), ya que los datos horizontales, por ejemplo se encuentran en su mayoría entre 6 y 6.5cm y los verticales entre 7 y 8cm.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas y del análisis realizado, se organizó la información considerada importante para definir las ventajas del prototipo sembrador frente a los tipos de siembra convencionales realizados (ver tabla 6-9).

**Tabla 6-9.: Evaluación del prototipo sembrador**

<b>Evaluación del Equipo</b>				
<b>Criterio de Evaluación</b>	<b>Eras</b>			
	<b>Al voleo</b>	<b>Línea continua</b>	<b>Golpes</b>	<b>Robot sembrador</b>
Distancias de siembra (Precisión en cm)	Baja	Baja	Media	Alta
Profundidad de semilla (Precisión en cm)	Baja	Media	Media	Alta
Semilla dispuesta por sitio de siembra	Baja	Baja	Media	Alta
Área aprovechada (%)	40 %	47 %	47 %	61 %
Densidad de siembra (Sitios de siembra/ha)	600.000	-	-	1'777.777
Gasto de semila (Kg)	5.5	-	-	4.9
Eficiencia en labor (h/ha)	6.66	10	11.7	672

Para ello entre los criterios de evaluación, se incluyeron la precisión en las distancias de plantación y profundidad junto con la cantidad de semilla y se comparó de manera cualitativa, teniendo como resultado que la siembra al voleo cuenta con una baja precisión tanto en las distancias como en la profundidad y cantidad de semilla dispuesta, esto se atribuye a la forma de distribución de la semilla, ya que al ser en forma de abanico no se garantiza ninguna de ellas; en el caso de la siembra en línea continua, se presenta una precisión baja para las distancias, pues a pesar de tratar de mantener las horizontales, son medidas que el sembrador considera suficientes, sin tener en cuenta las verticales ni la cantidad de semilla ya que estas se disponen de manera lineal al surco realizado; para la siembra a golpes, se consideró media precisión tanto en las distancias como profundidades y cantidad de semilla dispuesta, pues a pesar de tratar de mantener unas distancias horizontales, verticales y cierta cantidad de semilla siguen siendo medidas empíricas dadas por el agricultor.

Por su parte, el robot sembrador cuenta con alta precisión tanto en las distancias como en la profundidad y cantidad de semilla dispuesta, lo que permite garantizar la disposición óptima de la semilla, cumpliendo con el objetivo general del proyecto, permitiendo mantener un ahorro de semilla respecto a las otras prácticas por medio de mangueras que permiten mantener la disposición horizontal, un rodillo bajo la tolva de almacenamiento cuyo fin es seleccionar la cantidad de semilla y finalmente un seguidor de línea y control para mantener

la distancia vertical.

Así mismo, se tuvieron en cuenta otros criterios de evaluación, entre los que se incluyen el área aprovechada en porcentaje, la densidad de siembra y el gasto de semilla. Para la siembra al voleo, se determinó un área aprovechable de 40 %, lo cual explica porqué su densidad de siembra es baja en comparación con la densidad del robot sembrador, ya que al no aprovechar en mayor cantidad dicha área de siembra debido a la disposición y al hecho de requerir mayor espacio de no siembra para que una persona pueda distribuir la semilla, se ven limitados los sitios de siembra finales, en comparación con la siembra en línea continua y a golpes que a pesar de no garantizar completamente los valores requeridos para la siembra, al menos se organiza horizontalmente la disposición, lo que permite considerar un mayor porcentaje de área de siembra, en este caso de 47 %, teniendo en cuenta que estas también requieren a una persona que pueda disponer las semillas. El robot sembrador, tiene un mayor porcentaje de área aprovechada, ya que el espacio de no siembra solo incluye el tamaño de las ruedas y el pequeño espacio muerto entre la parte interna de las ruedas y los extremos de los sitios de siembra, esto permite que el terreno presente más plantas por hectárea, lo que se ve reflejado en mayor rendimiento y rentabilidad del cultivo.

Finalmente, el último aspecto que se tuvo en cuenta para la comparación de las formas o tipos de siembra, fue el tiempo de siembra en horas por hectárea, el cual no fue uno de los objetivos del proyecto, pero que a pesar de eso es necesario tener en cuenta para quienes va dirigido, en este caso medianos cultivadores de zanahoria. En principio al considerar los tipos de siembra convencionales, como se pudo evidenciar no garantizan en su totalidad ni las distancias, profundidad o cantidad de semilla necesaria, el tiempo es evidentemente mucho menor para la siembra al voleo (6.66 h/ha), en línea continua (10 h/ha) y a golpes (11.7 h/ha), pues en su mayoría, al no contar con tecnificación pretenden sembrar lo que más se pueda en el menor tiempo y así tratar de compensar las pérdidas en la producción con este. Por el contrario, el prototipo propuesto apunta a todo lo contrario, garantizar desde un principio un correcto desarrollo desde la siembra, evitando pérdidas. Por este motivo a pesar de demorarse 672 horas por hectárea, es un detalle que puede llegar a evaluarse y utilizar si es necesario más de un robot por hectárea, permitiendo disminuir dicho tiempo y mejorar la producción.

## 7. Conclusiones

- La distancia promedio horizontal (dada por la separación de las mangueras) se encuentra dentro del rango esperado y la vertical (dada por el controlador) promedio no supera 1 cm de diferencia respecto al ideal, sin embargo, esto ocurre por el tipo de control implementado y por las variaciones debido a la inercia que se presenta al relacionar la distancia entre siembra y siembra y el tamaño del prototipo.
- Utilizando un robot de baja velocidad con un controlador de seguimiento de camino se logró un error de seguimiento de camino de  $KTE = 0.007$ , lo cual garantiza que el robot realiza una trayectoria en línea recta, superando los obstáculos propuestos en el espacio de prueba sin afectar su estabilidad y manteniendo su dirección a través del terreno de prueba.
- El aprovechamiento del área de siembra manteniendo las distancias de plantación permitió obtener una densidad de 4.4Kg de semilla por hectárea, frente a la densidad de siembra convencional que ronda los 5Kg por hectárea, lo que quiere decir que el prototipo disminuye en un 12% la cantidad de semilla frente a la siembra convencional.
- Este tipo de herramientas tecnológicas permiten apoyar el trabajo de los medianos cultivadores, mejorando las labores que requieren precisión para obtener buen rendimiento en el producto sembrado. A partir del desempeño obtenido por este robot sembrador de zanahoria, es factible mejorar su autonomía y adicionalmente utilizar más prototipos de ser necesario.

## 8. Recomendaciones

Entre las mejoras que podría llegar a tener el robot propuesto para la siembra de zanahoria Var. Chantenay, se incluyen posibilidades tales como:

- Adicionar un teclado y pantalla LCD, para escribir la distancia que se desea recorrer exactamente.
- Incluir la opción para manejo por medio de control remoto haciendo que sea más fácil desplazar el robot hacia diferentes lugares y su ubicación entre ERA y ERA.
- Adecuar baterías con mayor corriente y así mejorar su autonomía.
- Incluir un sensor de corriente en cada uno de los motores dispuestos en las ruedas que permita sensar en caso de algún deslizamiento, pues cuando esta se desliza la corriente es baja y en ese caso la señal de velocidad no se tendría en cuenta evitando lecturas innecesarias.
- Utilizar un método exacto para abrir los orificios del rodillo de siembra, ya que cualquier variación en su tamaño puede afectar la cantidad de semilla dispuesta en el suelo y más aún teniendo en cuenta que la semilla de zanahoria es muy pequeña.
- Adecuar el trayecto de la semilla desde la tolva hasta el suelo con un material que no se doble como una manguera, o tratar de sostener esta con amarres o abrazaderas.
- Por último, en caso de necesitarlo, aumentar la capacidad de almacenamiento de la tolva.

## A. Anexo A: Diseños del prototipo

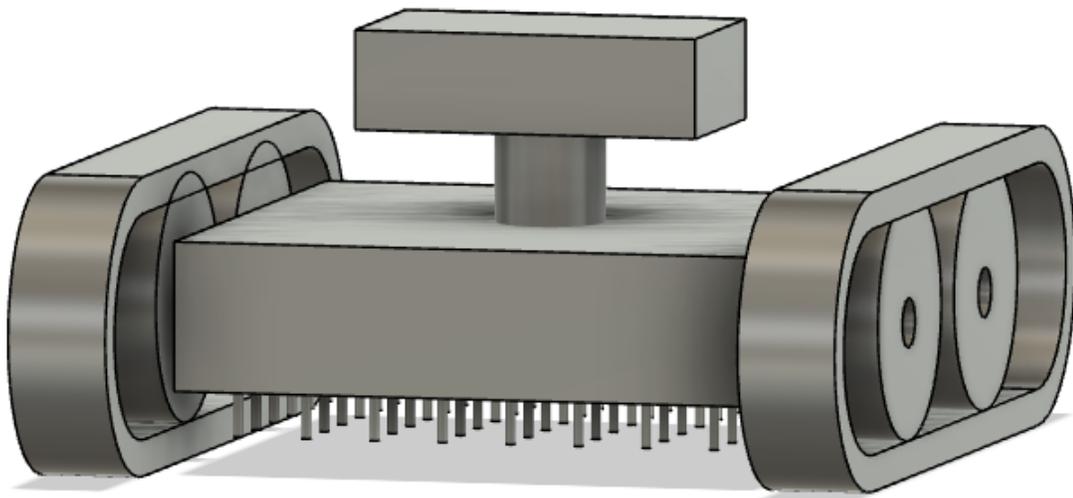
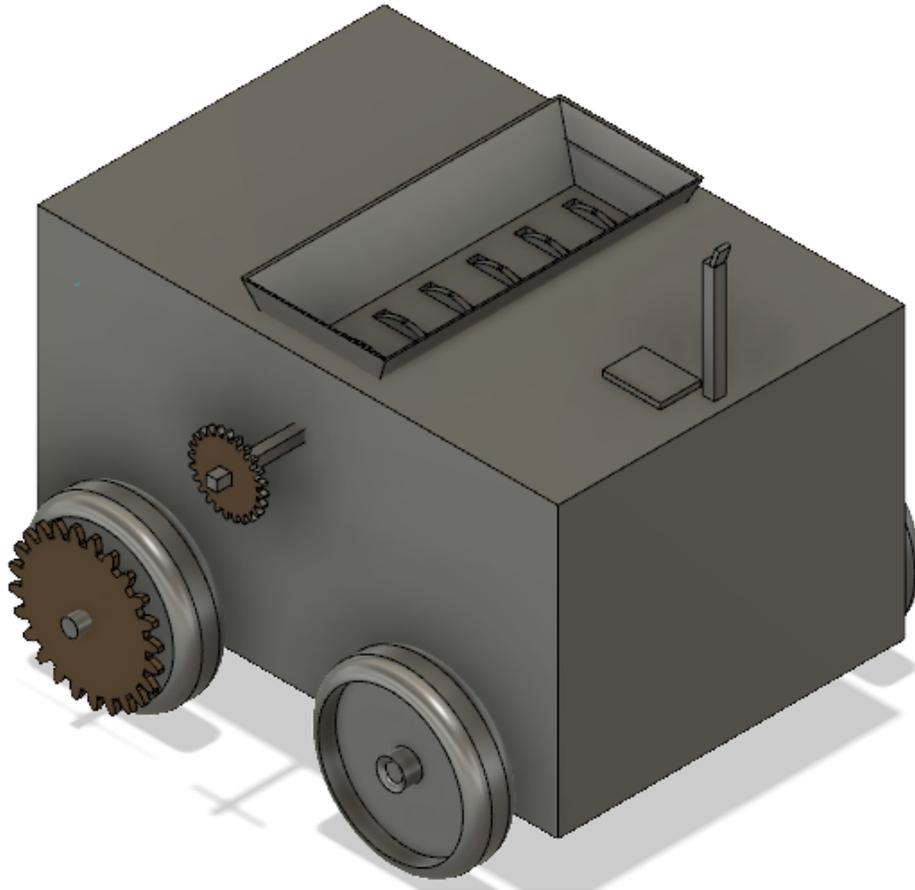


Figura A-1.: Primer diseño del prototipo



**Figura A-2.:** Segundo diseño del prototipo

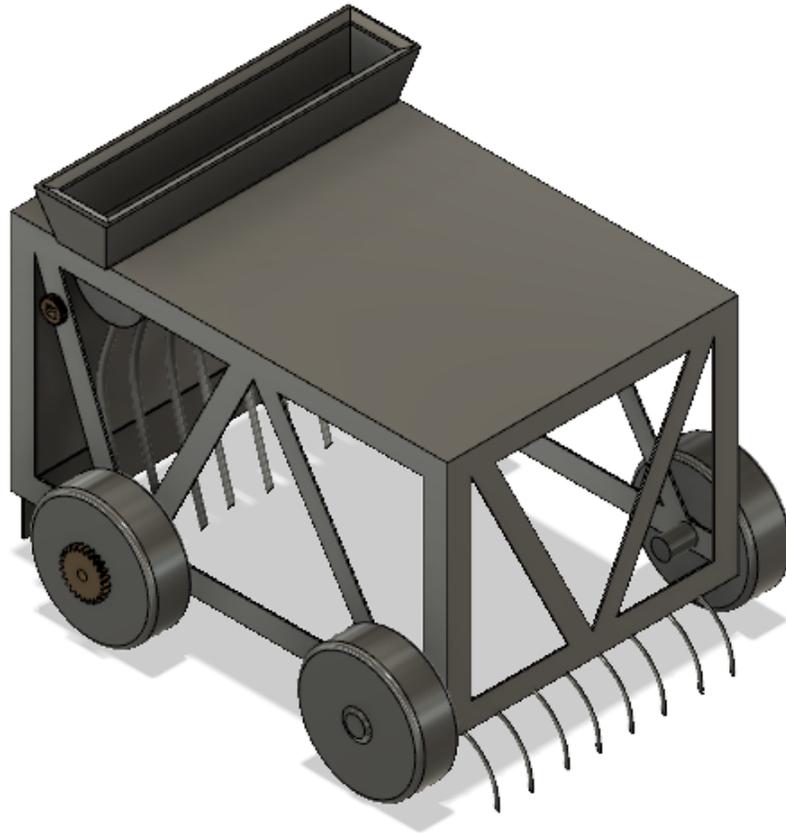
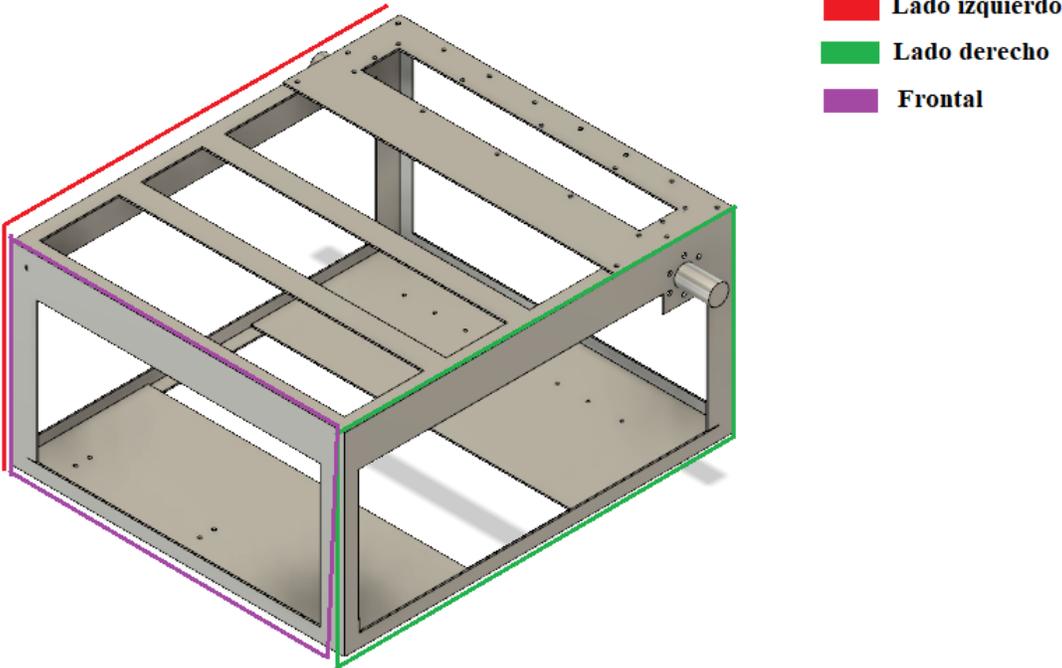


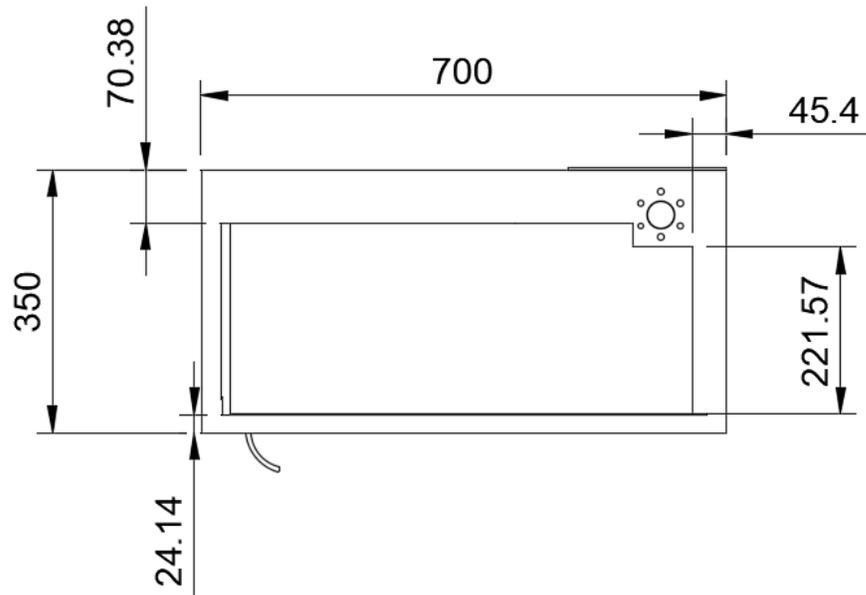
Figura A-3.: Tercer diseño del prototipo

# B. Anexo B: Planos del prototipo sembrador

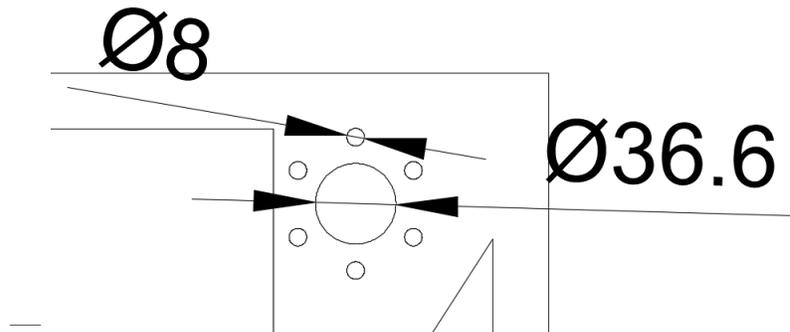
Diseño chasis



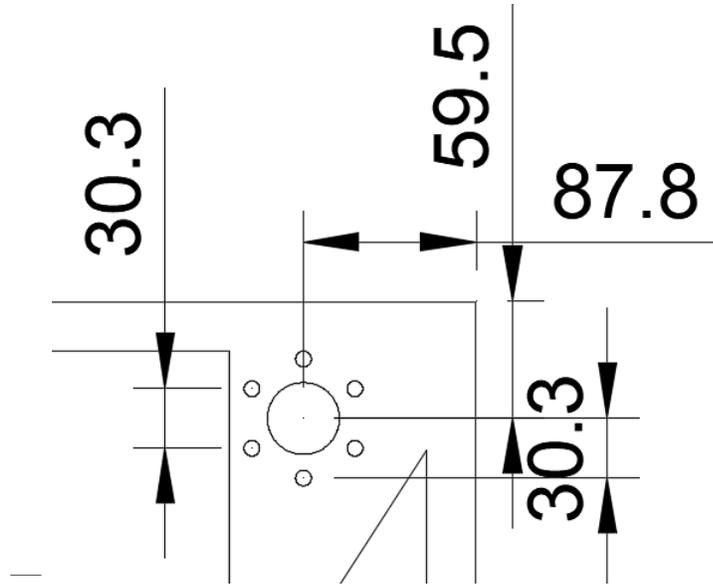
- Laterales (son iguales)



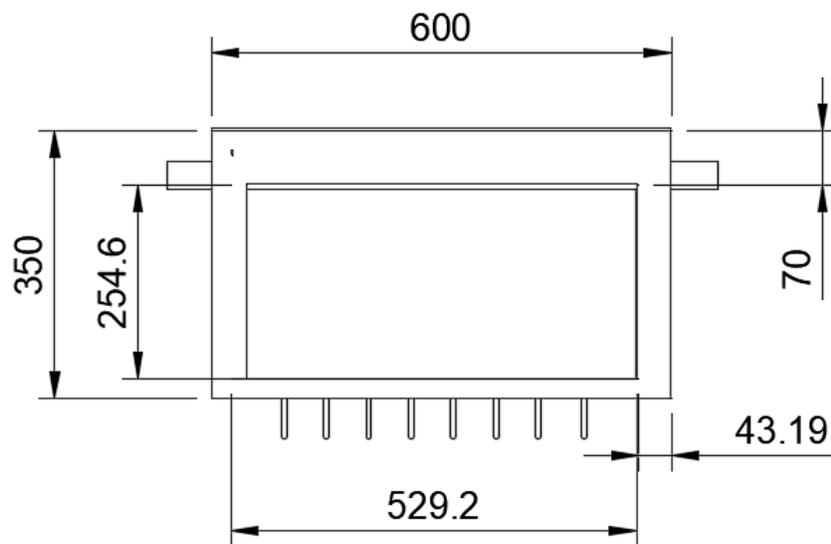
- Diámetros



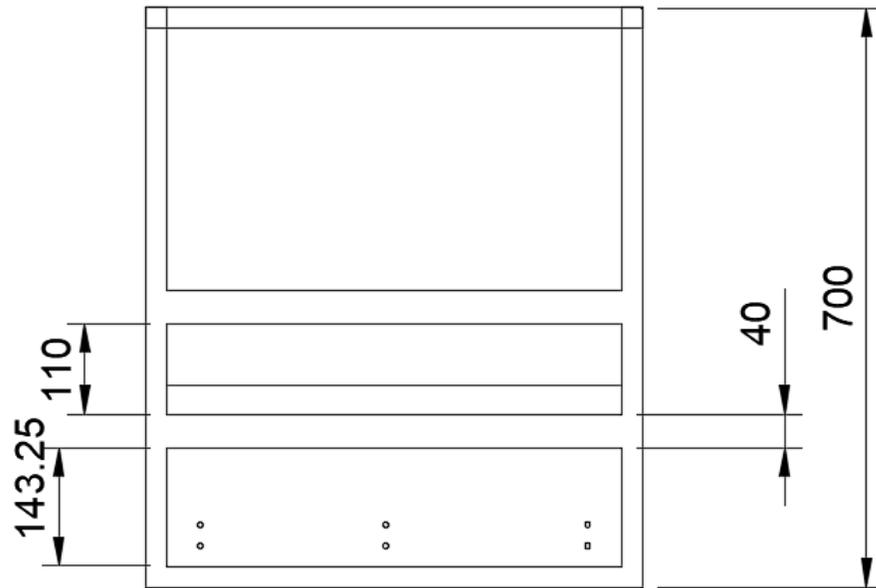
- Distancias del centro del círculo a los extremos



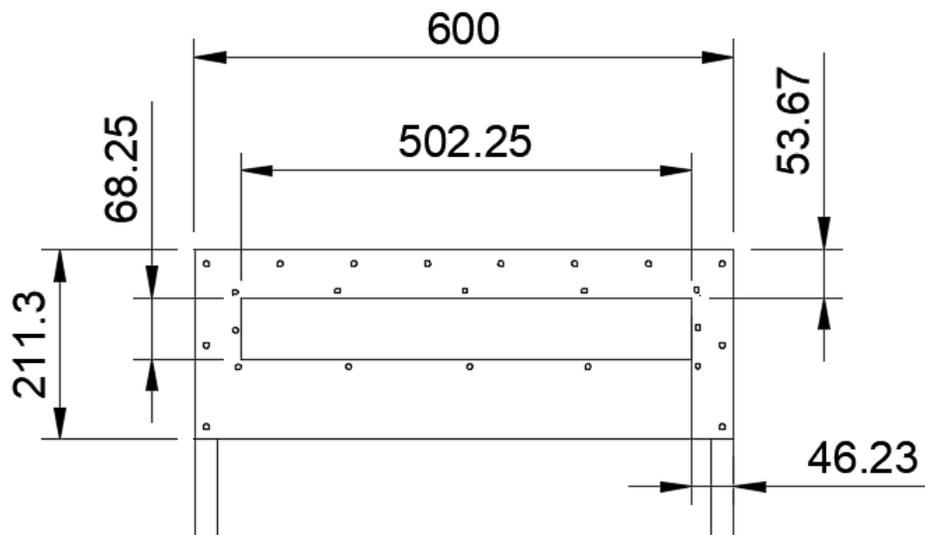
- Frontal



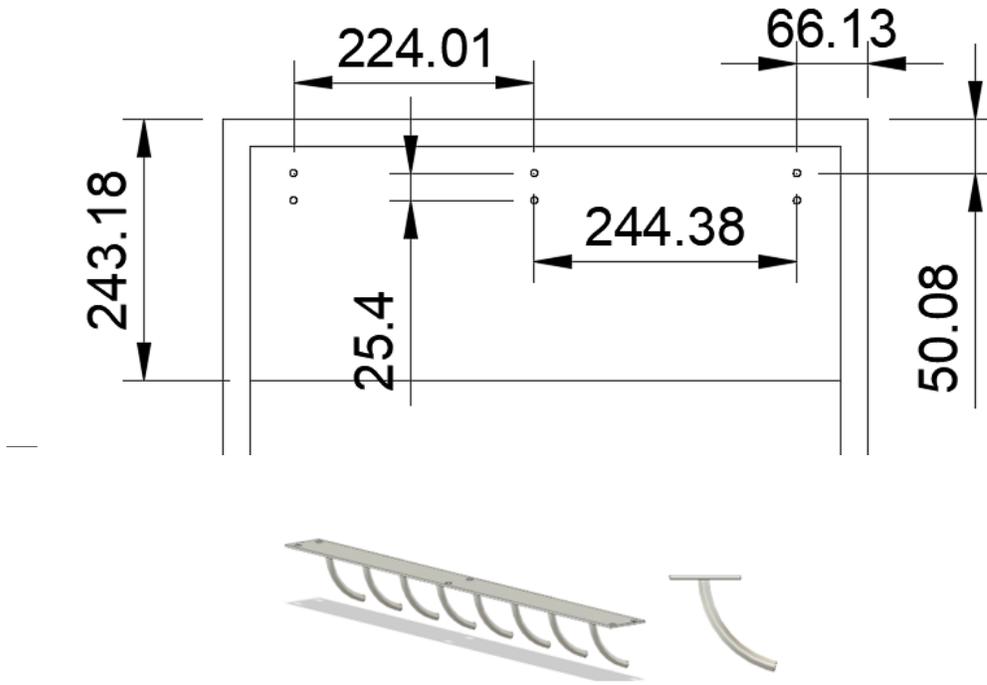
- Superior



- Lamina de soporte para la tolva

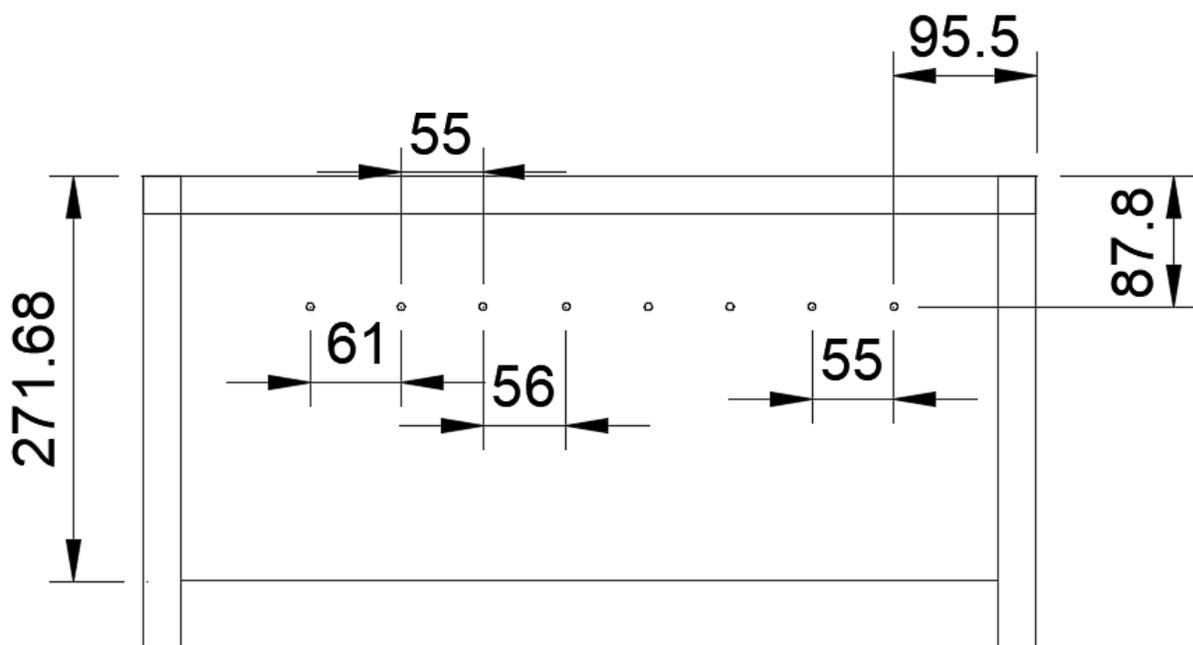


- Inferior (Garritas)

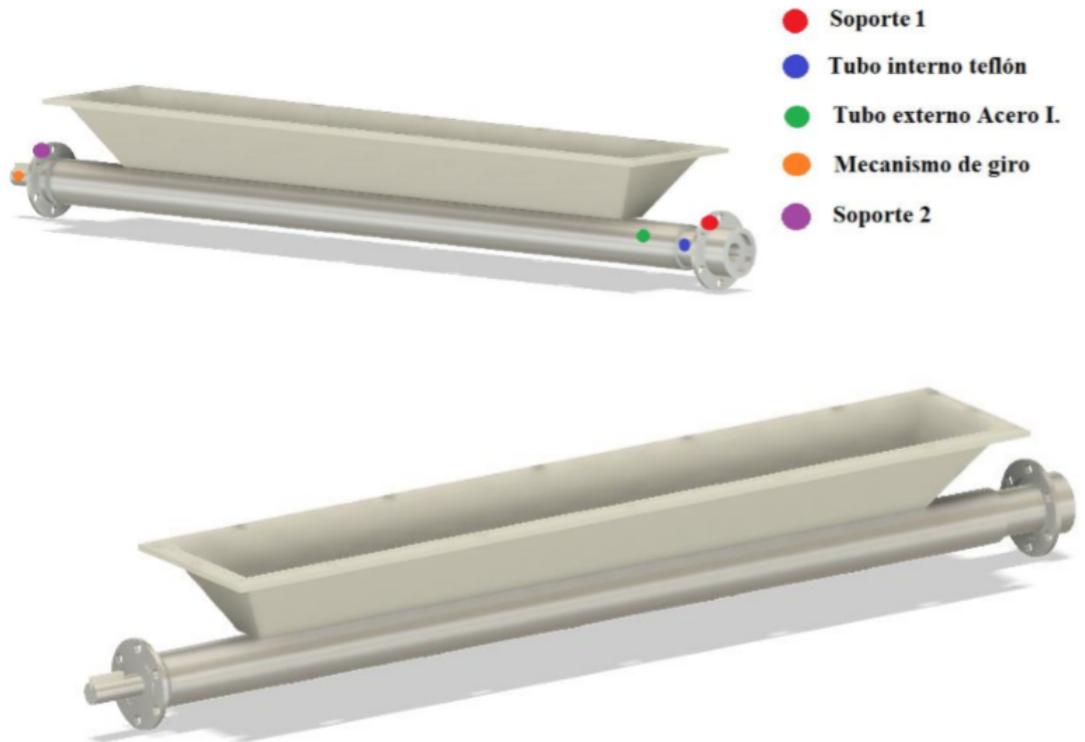


- Mangueras

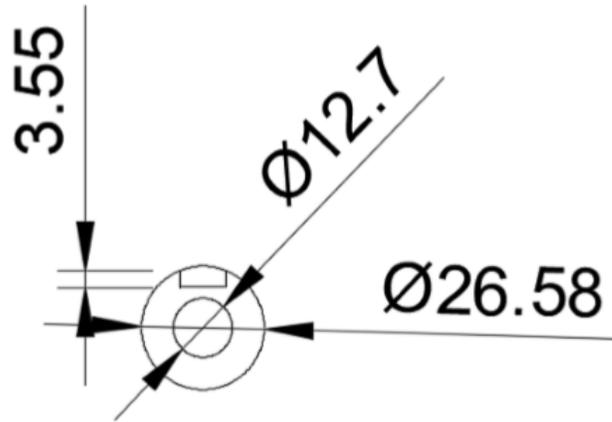
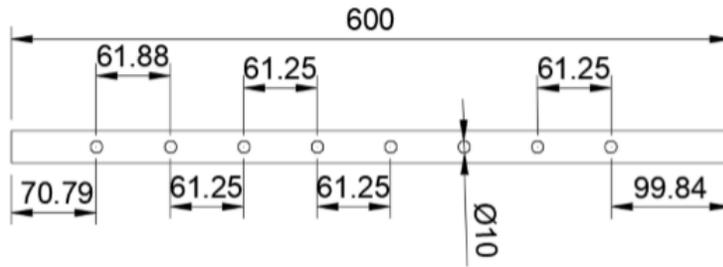
Diametro perforaciones 1 cm



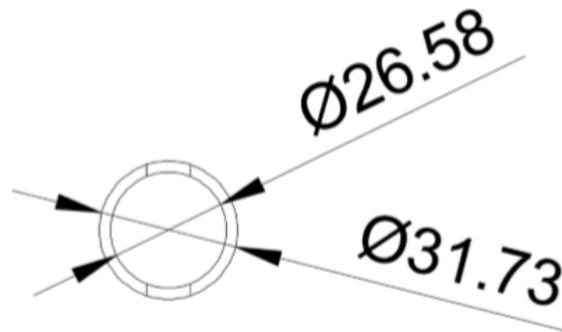
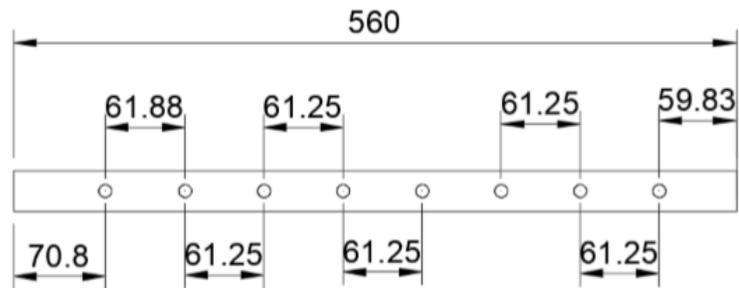
## Diseño tolva



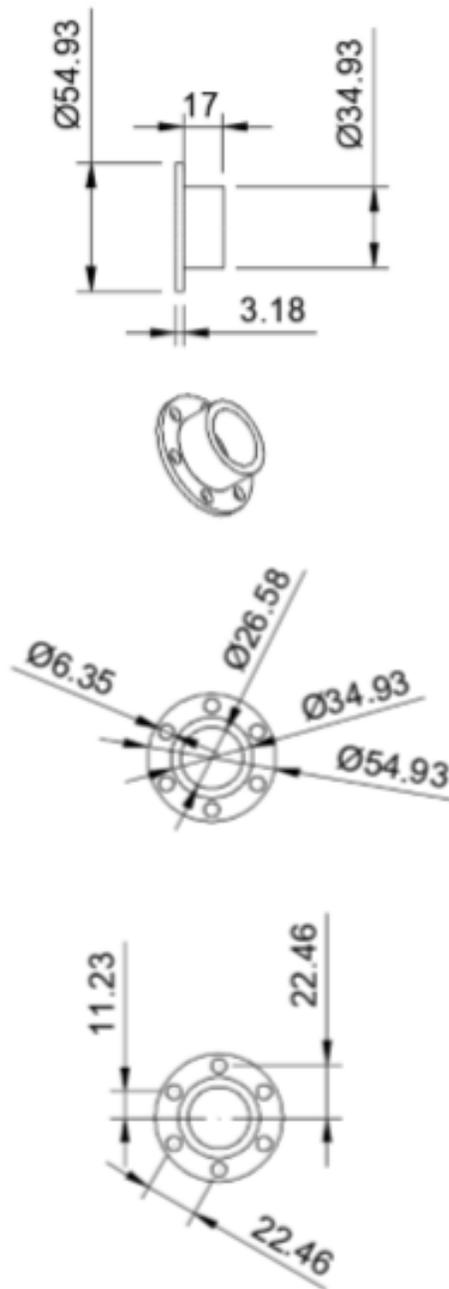
- Tubo interno teflón

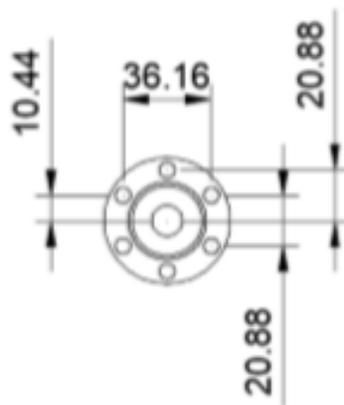
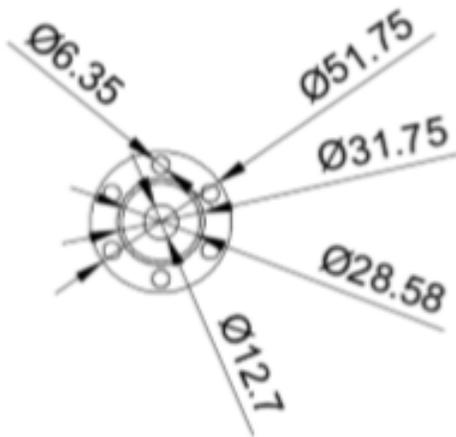
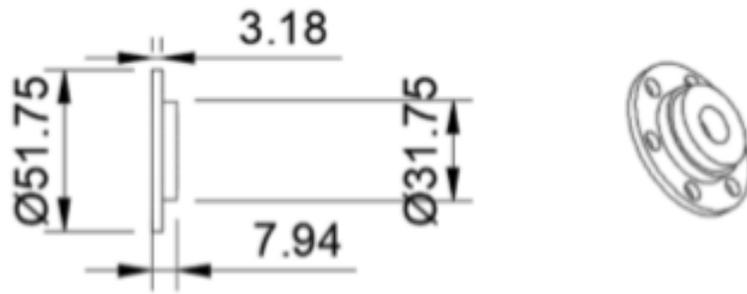


- Tubo externo acero inoxidable

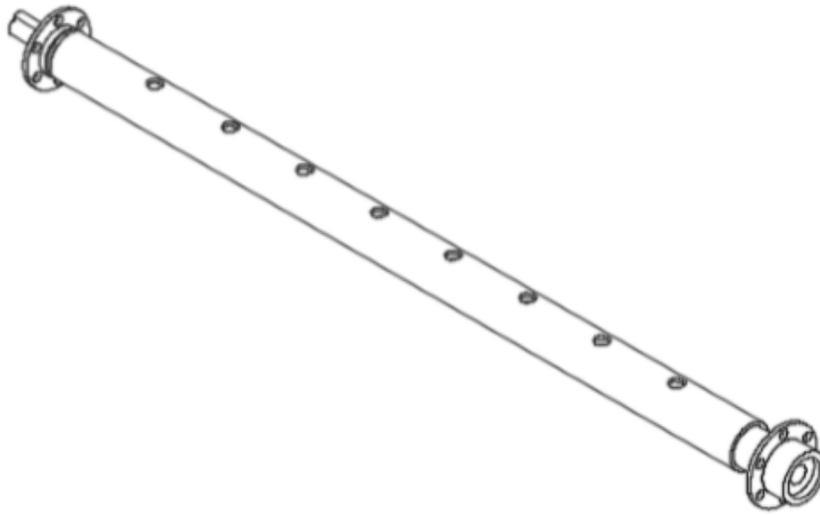


## ■ Soporte 1

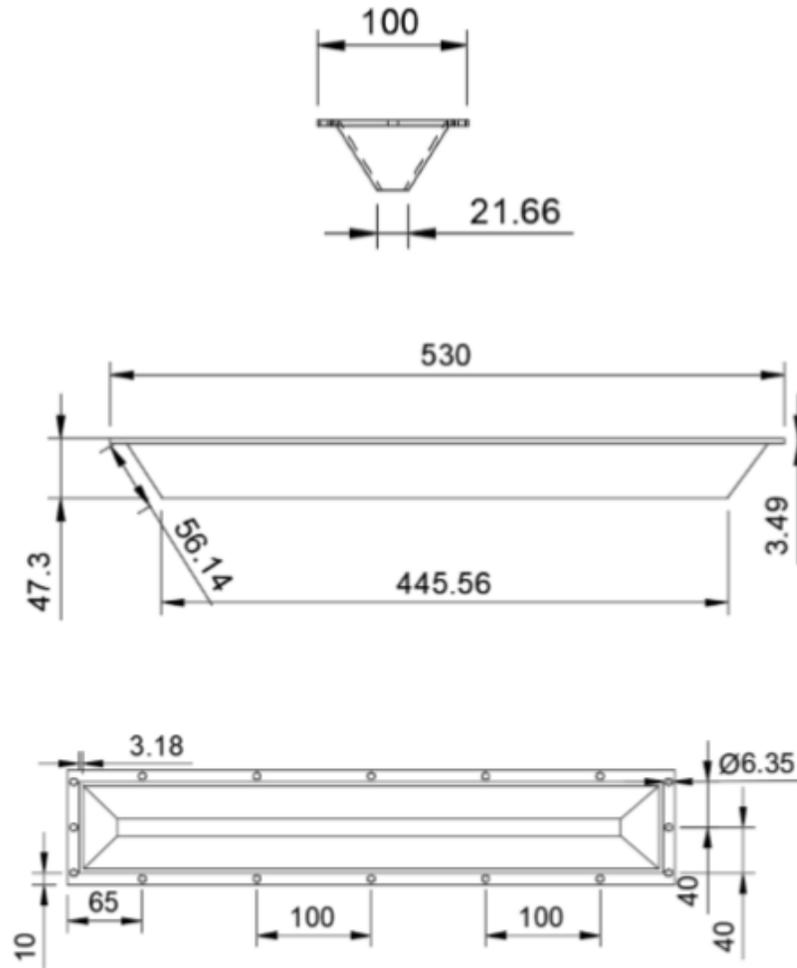




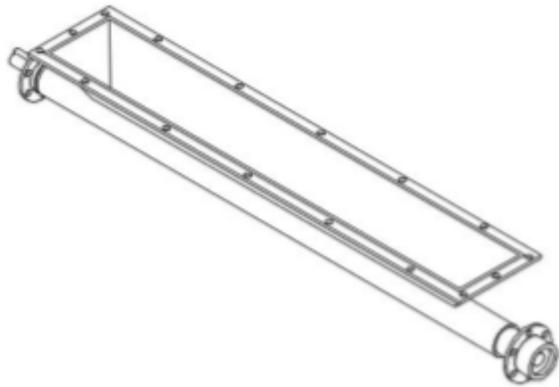
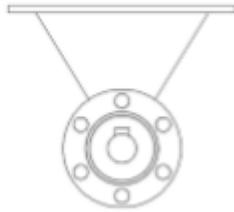
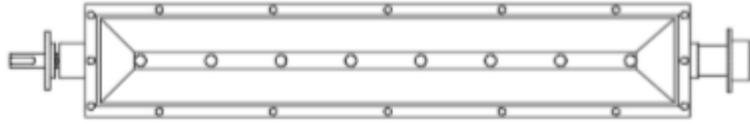
■ Vista pieza armada



## ■ Tolva



■ Pieza completa



## **C. Anexo C: Archivos de programación del control de alto y bajo nivel**

Los siguientes codigos se realizaron en ROS que maneja lenguaje Python

- Seguidor de camino

```
#!/usr/bin/env python
#!/usr/bin/env python
import rospy
from geometry_msgs.msg import Twist, Quaternion
from turtlesim.msg import Pose
from math import pow, atan2, sqrt, sin, cos, tanh, pi
from std_msgs.msg import String, Int32, Float32
from turtlesim_cleaner.msg import camino

class TurtleBot:

    def __init__(self):
        rospy.init_node('sembrador', anonymous=True)
        self.vel_publisher = rospy.Publisher('velss',
                                             Twist, queue_size=10)
        self.tolv_publisher = rospy.Publisher('tolVa',
                                             Int32, queue_size=10)
        self.rpmI_subscriber=rospy.Subscriber('rpmI', Quaternion, self.datY)
        self.rpmD_subscriber=rospy.Subscriber('rpmD', Quaternion, self.datX)
        self.Imu_subscriber=rospy.Subscriber('imu', Quaternion, self.Imu)
        self.tolva_subscriber=rospy.Subscriber('Tolv', Int32, self.Tolv)
        self.equis=camino()

self.equis.x=[0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,0.10,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2.0]
self.equis.y=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
self.dats1=Quaternion()
self.dats2=Quaternion()
self.imu=Quaternion()
self.goal_pose= Pose()
self.pose = Pose()
self.tolva = Int32()
self.tolva2 = Int32()
self.Ua=0
self.X=0
self.Y=0
self.eiy=0
self.Eay=0
self.eix=0
self.Eax=0
self.V=float()
self.motx=float()
self.moty=float()
self.xP=float()
self.vel_motx=float()
self.vel_moty=float()
self.rate = rospy.Rate(10)

    def Tolv(self, data):
        self.tolva=data
        self.tolva.data=self.tolva.data

    def Imu(self, data):
```

---

```

        self.imu=data
        self.imu.w=self.imu.w
        self.pose.theta=self.imu.w
    def datX(self, data):
        self.dats1=data
        self.dats1.x=self.dats1.x
    def datY(self, data):
        self.dats2=data
        self.dats2.y=self.dats2.y
        self.V=(0.26)*((self.dats2.y+self.dats1.x)/2.0)
        self.w=(self.pose.theta-self.Ua)/0.1
        self.xP=self.V*cos(self.pose.theta)-(0.3*self.w*sin(self.pose.theta))
        self.yP=self.V*sin(self.pose.theta)+(0.3*self.w*cos(self.pose.theta))
        self.X=(self.xP*0.01)+self.X
        self.Y=(self.yP*0.01)+self.Y
        self.pose.x=self.X
        self.pose.y=self.Y
        self.xtilde=self.goal_pose.x - self.pose.x
        self.ytilde=self.goal_pose.y - self.pose.y
        self.steering_angle= atan2(self.ytilde, self.xtilde)

        self.Vr=(cos (self.pose.theta)*((0.08*cos(self.steering_angle))
+(0.2*tanh((0.2/0.2)*self.xtilde))))+(sin
(self.pose.theta)*((0.08*sin(self.steering_angle))
+(0.2*tanh((0.2/0.2)*self.ytilde))))

        self.Wr=(((1/0.1)*sin
(self.pose.theta)*((0.08*cos(self.steering_angle))
+(0.2*tanh((0.2/0.2)*self.xtilde))))+(((1/0.1)*cos
(self.pose.theta)*((0.08*sin(self.steering_angle))
+(0.2*tanh((0.2/0.2)*self.ytilde))))
        if self.Vr>0.075:
            self.Vr=0.075
        if self.Wr>0.075:
            self.Vr=0.075
        if self.Vr<0.0:
            self.Vr=0.0
        if self.Wr<0.0:
            self.Vr=0.0
        self.motx=self.Vr+((self.Wr*0.26)/2)
        self.Cpx=15*(self.motx-self.dats1.x)
        self.edx=((self.motx-self.dats1.x)-self.Eax)/0.01
        self.eix=((self.motx-self.dats1.x)*0.01)+self.eix
        self.Cdx=2*self.edx
        self.Cix=96*self.eix
        self.Eax=(self.motx-self.dats1.x)
        self.vel_motx=round((self.Cpx+self.Cdx+self.Cix),4)

        self.moty=self.Vr-((self.Wr*0.26)/2)
        self.Cpy=20*(self.moty-self.dats2.y)

```

```

self.edy=((self.moty-self.dats2.y)-self.Eay)/0.01
self.eiy=((self.moty-self.dats2.y)*0.01)+self.eiy
self.Cdy=5*self.edy
self.Ciy=74*self.eiy
self.vel_moty=round((self.Cpy+self.Cdy+self.Ciy),4)
self.Eay=(self.moty-self.dats2.y)

self.Ua=self.pose.theta
def euclidean_distance(self, goal_pose):
    return sqrt(pow((goal_pose.x - self.pose.x), 2) +
                pow((goal_pose.y - self.pose.y), 2))

def move2goal(self):
    self.distance_tolerance = 0.002
    vel_msg = Twist()
    for i in range(len(self.equis.x)):
        self.tr=0
        self.goal_pose.x = self.equis.x[i]
        self.goal_pose.y = self.equis.y[i]
        while self.tr==0:
            vel_msg.linear.x=self.vel_motx
            vel_msg.linear.y=self.vel_moty
            vel_msg.linear.z=0
            self.vel_publisher.publish(vel_msg)
            self.tolva2.data=0
            self.tolv_publisher.publish(self.tolva2)

rospy.loginfo(self.euclidean_distance(self.goal_pose))
            if self.euclidean_distance(self.goal_pose) <=
self.distance_tolerance:
                self.tr=1
                while self.tolva2.data<=5910:
                    self.tolva2.data=190
                    self.tolv_publisher.publish(self.tolva2)

rospy.loginfo(self.euclidean_distance(self.goal_pose))
                vel_msg.linear.x=0
                vel_msg.linear.y=0
                self.vel_publisher.publish(vel_msg)
                self.tolva2.data=0
                self.tolv_publisher.publish(self.tolva2)
                self.tolva2.data=0
                self.tolv_publisher.publish(self.tolva2)
                vel_msg.linear.x = 0
                vel_msg.linear.y = 0
                self.vel_publisher.publish(vel_msg)
                self.rate.sleep()

if __name__ == '__main__':
    try:
        x = TurtleBot()
        x.move2goal()
    except rospy.ROSInterruptException:
        pass

```

- Programa para adquirir datos del encoder del motor 1

```

#include "BTS7960.h"
#include <ros.h>
#include <geometry_msgs/Quaternion.h>
#include <geometry_msgs/Twist.h>
int encoder_pin = 2;
float rpm = 0;
float velocity = 0;
float u;
const uint8_t EN = 8;
const uint8_t L_PWM = 9;
const uint8_t R_PWM = 10;
int speed;
BTS7960 motorController(EN, L_PWM, R_PWM);
volatile float pulses = 0;
unsigned long timeold = 0;
unsigned int pulsesperturn = 22;
int ratio = 522;
#define OUTPUT_READABLE_ACCELYRO
ros::NodeHandle nh;
geometry_msgs::Quaternion rpm_msg;
ros::Publisher rpmI("rpmI", &rpm_msg);
void control(const geometry_msgs::Twist& velo_msg){
    u=velo_msg.linear.y;
}
ros::Subscriber<geometry_msgs::Twist> sub("velss", &control);
void counter(){
    pulses++;}
void setup()
{
    pinMode(encoder_pin, INPUT);
    attachInterrupt(0, counter, RISING);
    Serial.begin(57600);
    pulses = 0;
    rpm = 0;
    timeold = 0;
    nh.initNode();
    nh.advertise(rpmI);
    nh.subscribe(sub);
}

void loop()
{
    motorController.Enable();
    if (millis() - timeold >= 1000){
        noInterrupts();
        rpm = 60 * pulses / pulsesperturn * 1000 / (millis() - timeold) ;
        velocity = (((rpm/522)*2*3.1416)/60) * 0.13;
        pulses = 0;
        timeold = millis();
        interrupts();
    }
}

```

```

        if(u<0){
            speed=min(255,max(0,u*-1));
            motorController.TurnLeft(speed);
        }
        else{
            speed=min(255,max(0,u));
            motorController.TurnRight(speed);
        }
        rpm_msg.y = velocity;
        rpmI.publish( &rpm_msg );
        nh.spinOnce();
        delay(10);
    }
}

```

## ■ Programa para adquirir datos del encoder del motor 2

```

#include "BTS7960.h"
#include <ros.h>
#include <geometry_msgs/Quaternion.h>
#include <geometry_msgs/Twist.h>
int encoder_pin = 2;
float rpm = 0;
float velocity = 0;
float u;
const uint8_t EN = 8;
const uint8_t L_PWM = 9;
const uint8_t R_PWM = 10;
int speed;
BTS7960 motorController(EN, L_PWM, R_PWM);
volatile float pulses = 0;
unsigned long timeold = 0;
unsigned int pulsesperturn = 22;
int ratio = 522;
ros::NodeHandle nd;
geometry_msgs::Quaternion rpm_msg;
ros::Publisher rpmD("rpmD", &rpm_msg);
void control(const geometry_msgs::Twist& velo_msg){
    u=velo_msg.linear.x;
}

ros::Subscriber<geometry_msgs::Twist> sub("velss", &control);
void counter(){
    pulses++;}
void setup()
{
    pinMode(encoder_pin, INPUT);
    attachInterrupt(0, counter, RISING);
    Serial.begin(57600);
    pulses = 0;
    rpm = 0;
    timeold = 0;
    nd.initNode();
    nd.advertise(rpmD);
    nd.subscribe(sub);
}
}

```

---

```
void loop()
{
  motorController.Enable();
  if (millis() - timeold >= 1000){
    noInterrupts();
    rpm = 60 * pulses / pulsesperturn * 1000 / (millis() - timeold) ;
    velocity = (((rpm/522)*2*3.1416)/60)*0.13;
    pulses = 0;
    timeold = millis();
    interrupts();
  }
  if(u<0){
    speed=min(255,max(0,u*-1));
    motorController.TurnLeft(speed);
  }
  else{
    speed=min(255,max(0,u));
    motorController.TurnRight(speed);
  }
  rpm_msg.x = velocity;
  rpmD.publish( &rpm_msg );
  nd.spinOnce();
  delay(10);
}
}
```

- Programa para adquirir datos del encoder del motor de la tolva

```

#include "BTS7960.h"
#include <ros.h>
#include <std_msgs/Int32.h>
int encoder_pin = 2;
float rpm = 0;
float velocity = 0;
float u;
const uint8_t EN = 8;
const uint8_t L_PWM = 9;
const uint8_t R_PWM = 10;
int speed;
BTS7960 motorController(EN, L_PWM, R_PWM);
volatile float pulses = 0;
unsigned long timeold = 0;
unsigned int pulsesperturn = 22;
int ratio = 522;
ros::NodeHandle nt;
std_msgs::Int32 tol_msg;
ros::Publisher tolva("Tolv", &tol_msg);
void control(const std_msgs::Int32& velo_msg){
    u=velo_msg.data;
    motorController.Enable();
    speed=u;
    motorController.TurnRight(speed);
    if (u==0){
        pulses=0;
    }
}

ros::Subscriber<std_msgs::Int32> sub("tolva", &control);
void counter(){
    pulses++;}
void setup()
{ pinMode(encoder_pin, INPUT);
  attachInterrupt(0, counter, RISING);
  pulses = 0;
  rpm = 0;
  timeold = 0;
  nt.initNode();
  nt.advertise(tolva);
  nt.subscribe(sub);
}

void loop()
{
  tol_msg.data=pulses;
  tolva.publish( &tol_msg );
  nt.spinOnce();
  delay(10);
}

```

## D. Anexo D: Algoritmo Genético

Es importante tener en cuenta que los siguientes codigos se relalizaron en MATLAB

- **Función Papas**

```
function o=Papas(nump,err,pob)
ord=sort(err);
o=zeros(nump,3);
h=1;
mej=ord(1:nump);
for i=1:nump
t=mej(i,1);
[x,y]=find(err==t);
if size(x,1)>1
x=x(h,1);
h=1+h;
end
o(i,:)=pob(x,:);
end
```

- **Función Hijos**

```
function f=Hijos(papas,ind,min,max)
hij=ind-length(papas);
yi=0;
for i=1:hij-1
p=papas(i,:);
u=papas(i+1,:);
for j=1:3
yu=randi([1 3],1,1);
if (yu==yi) & (j==2)
if (yu==1)
yu=yu+1;
end
if (yu==3)
yu=yu-2;
```

```
end
end
sf(1,j)=p(1,yu);
if j==3
sf(1,j)=u(1,yu);
end
yi=yu;
end
ye=randi([1 3],1,1);
mut=randi([min max],1,1);
sf(1,ye)=mut;
o(i+1,:)=sf;
end
o(1,:)=papas(1,:);
f=o;
```

#### ■ **Función FC**

```
function ITAE=FC(ft,pob,t,tm,s)
ITAE=zeros(length(pob),1);
for i=1:size(pob,1)
Kp=pob(i,1);
Kd=pob(i,2);
Ki=pob(i,3);
C=Kp+(Kd*s)+(Ki/s);
Er=1-step(feedback(ft*C,1),t);
ITAE(i)=sum(t'.*abs(Er)*tm);
end
```

---

- **Código Algoritmo Genético**

```
KD=676.27
KI=667.3;
s=tf('s');
FMD=KD/((2.9e-10*s+1)*(0.001493*s+1));
FMI=KI/((4.1e-7*s+1)*(0.001298*s+1));
Tm=0.01;
t=[0:Tm:1];
crom=3;Ind=200;Gens=20;Min=0;Max=80;
cant=Ind/2;
PobI=randi([Min,Max],Ind,crom);
Err=FC(FMD,PobI,t,Tm,s);
Papasm=Papas(cant,Err,PobI);
PobI=Hijos(Papasm,Ind,Min,Max);
kt=0;
for i=1:Gens
    Err=FC(FMD,PobI,t,Tm,s);
    Papasm=Papas(cant,Err,PobI);
    PobI=Hijos(Papasm,Ind,Min,Max);
    acu=err(1,1)+acu;
end
kt=acu/Gens;
Res=FC(FMD,PobI,t,Tm,s);
Hijosm=Papas(cant,Err,PobI);
Deff=Hijosm(1,:);
```

## E. Anexo E: Presupuesto

PARTE DEL PROTOTIPO		PRECIO
<i>SISTEMA DE SIEMBRA</i>		\$ 515.500
<i>ROBOT MÓVIL</i>	<i>Componentes electrónicos</i>	\$ 1'707.500
	<i>Componentes mecánicos</i>	\$ 1'124.000
	<i>Chasis</i>	\$ 500.000
<b>TOTAL</b>		3'847.000

**Figura E-1.:** Presupuesto estimado del robot sembrador de zanahoria

# Bibliografía

- [(AADECA) Asociación Argentina de Control Automático, 2008] (AADECA) Asociación Argentina de Control Automático (2008). Una introducción a los robots móviles.
- [Acosta, 2017] Acosta, S. (2017). Asistencia técnica y transferencia de tecnologías en el sistema productivo de zanahoria (*daucus carota*) integrando la metodología participativa (pipa) en el municipio de villapinzón cundinamarca.
- [Agencia Nacional de Tierras, 2018] Agencia Nacional de Tierras (2018). Proyecto resolución UAF predial.
- [Agronet, 2015] Agronet (2015). Zanahoria.
- [Aliexpress, 2013] Aliexpress (2013). Gw4058-555 turbine worm gear motor with magnetic encoder hall 11ppr 95w torque motor cw cew parking lock motor.
- [Alvaro García Cazorla, 2013] Alvaro García Cazorla (2013). Ros: Robotic operating system.
- [Alvaro García López, 2010] Alvaro García López (2010). Desarrollo del sistema de locomoción de una plataforma hardware para robocup small soccer league (ssl).
- [A.M. EVERS, 1997] A.M. EVERS, H. TUURI, M. H. S. P. U. H. H. T. (1997). Soil forming and plant density effects on carrot yield and internal quality.
- [Anasac, 2011] Anasac (2011). Zanahoria chantenay redco.
- [Andri Mirzal, 2014] Andri Mirzal, Shinichiro Yoshii, M. F. (2014). Pid parameters optimization by using genetic algorithm. *Graduate School of Information Science and Technology Hokkaido University*.
- [Arranz de la Peña, 2005] Arranz de la Peña, J. (2005). Algoritmos genéticos.
- [Arroyave, 2013] Arroyave, S. (2013). Zanahoria chantenay special.
- [Barón, 2013] Barón, C. A. S. (2013). La inercia de la estructura agraria en colombia: Determinantes recientes de la concentración de la tierra mediante un enfoque espacial.

- [Baturone, 2001] Baturone, A. O. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles*. MARCOMBO.
- [BAZÁN, 2007] BAZÁN, L. A. C. (2007). Agrotecnia sostenible.
- [Blanco Abia, 2014] Blanco Abia, C. (2014). Desarrollo de un sistema de navegación para un robot móvil.
- [BO LI, 1976] BO LI, ANDREW R. WATKINSON, T. H. (1976). Dynamics of competition in populations of carrot (*daucus carota*). *Science Direct*.
- [Botia, ] Botia, W. H. Resolución 041 de 1996.
- [Botia, 2010] Botia, W. H. (2010). Unidad agrícola familiar (uaf), instrumento de política pública agropecuaria en colombia.
- [Caicedo, 2015] Caicedo, J. M. G. (2015). Navegación de un robot móvil sobre terreno irregular con contacto de su brazo con el suelo.
- [Castillo, 2017] Castillo, Jairo; Rojas, V. M. J. (2017). Determinación del torque y potencia de un motor de combustión interna a gasolina mediante el uso de bujía con sensor de presión adaptado y aplicación de un modelo matemático. *Revista Politécnica*, 39.
- [CASTRO, 2014] CASTRO, V. C. (2014). Abonamiento orgánico en base a cuatro niveles de humus de lombriz y dos sistemas de siembra en el cultivo de zanahoria (*Daucus carota L.*) var. chantenay en condiciones de zonas Áridas. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*.
- [(CCB) Cámara de Comercio de Bogotá, 2015] (CCB) Cámara de Comercio de Bogotá (2015). Manual zanahoria. programa de apoyo agrícola y agroindustrial vicepresidencia de fortalecimiento empresarial cÁmara de comercio de bogotÁ.
- [(CCI), 2010] (CCI), C. C. I. (2006-2010). Plan hortícola nacional.
- [Centro universitario UAEM Zumpango, 2015] Centro universitario UAEM Zumpango (2015). Tipos de locomoción en robots móviles.
- [CEVA, 2013] CEVA (2013). What is an imu sensor?
- [Colorado Arellano Othon, 2018] Colorado Arellano Othon, Hernández Romero Norberto, S. T. M. J. C. M. M. J. (2018). Algoritmo genético aplicado a la sintonización de un controlador pid para un sistema acoplado de tanques. *UAEH*.
- [Control, 2011] Control, P. (2011). Incremental encoders.
- [Cook, 2015] Cook, D. (2015). *Robot Building for beginners*. Technology In Action, 3 edition.

- [Cáceres Flórez et al., 2015] Cáceres Flórez, C., Sandoval, O., and Hurtado, D. (2015). Procesamiento de imágenes para reconocimiento de daños causados por plagas en el cultivo de begonia semperflorens (flor de azúcar). *Acta Agronómica*, 64:273–279.
- [Cánovas, 2011] Cánovas, J. A. G. (2011). Robótica móvil. estudio y caracterización del robot móvil kjunior desarrollo de aplicación de robot laberinto.
- [DANE, 2017] DANE (2017). Características relevantes en el cultivo de la zanahoria (*Daucus carota L.*) en Colombia y estudios de caso sobre costos de producción en los municipios de Madrid (Cundinamarca) y Ventaquemada (Boyacá). *Boletín mensual INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA*, 60.
- [DIACONIA, 2017] DIACONIA (2017). Guía práctica del biohuerto.
- [DINERO, 2016] DINERO (2016). Las nuevas tendencias de los consumidores en el mundo. *DINERO*.
- [(DNP) Departamento Nacional de Planeación, 2015] (DNP) Departamento Nacional de Planeación (2015). Seguridad alimentaria y nutricional.
- [Dr. Abelardo del Pozo Quintero, 2012] Dr. Abelardo del Pozo Quintero (2012). Modelo cinemático dinámico del mini robót móvil ricimaf. *Revista Scielo*, 33.
- [Dynapar, 2010] Dynapar (2010). What is an incremental encoder?
- [(EDA) Entrenamiento y Desarrollo de Agricultores, 2007] (EDA) Entrenamiento y Desarrollo de Agricultores (2007). Manual de producción de zanahoria.
- [Eladio Rey, 2014] Eladio Rey, J. A. L. . C. M. C. (2014). Aportes metodológicos para la asistencia técnica agropecuaria en las unidades agrícolas familiares. bogotá d.c.
- [Etxeberria, 2010] Etxeberria, J. A. (2010). Algoritmo de reconocimiento de forma y color para una plataforma robótica.
- [Extremo, 2018] Extremo, R. (2018). Cargador profesional inteligente imax b6 ac 80w.
- [Fierro, a] Fierro, C. Ajuste de controladores.
- [Fierro, b] Fierro, C. Diseño de los sistemas de control.
- [FINAGRO, 2019] FINAGRO (2019). Portafolio de servicios.
- [García, 2019] García, J. A. C. (2019). Estudio de factibilidad para la creación de la cooperativa de trabajo asociado la unión del zipa -cootraunión- conformada por agricultores de zanahoria en la vereda pueblo viejo, zipacón, cundinamarca.

- [García, 2014] García, M. (2014). El cultivo de zanahoria.
- [García García Rafael Adrian1, 2016] García García Rafael Adrian1, A. M. M. (2016). Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate. *Asociación Mexicana de Mecatrónica*.
- [Gaviola, 2018] Gaviola, J. (2018). Manual de producción de zanahoria.
- [Gloria Helena González Blair, 2010] Gloria Helena González Blair, Jesús Antonio Galvis Vanegas, A. F. V. (2010). Manual de la zanahoria mínimamente procesada. variedad chantenay y baby.
- [Gray, 1994] Gray, D., . B. L. R. (1994). Controlling the size of carrot - the roles of seed quality and plant density.
- [Gulam Amer, 2015] Gulam Amer, S.M.M. Mudassir, M. M. (2015). Design and operation of wi-fi agribot integrated system.
- [Hidalgo, 2015] Hidalgo, A. P. (2015). Resumen de las principales características de controladores pid.
- [(ICA) Instituto Colombiano Agropecuario, 2002] (ICA) Instituto Colombiano Agropecuario (2002). Semilleros: Recomendaciones para su preparación y manejo fitosanitario en la cebolla de bulbo y otras hortalizas.
- [(INIA) Ministerio de agricultura, 2012] (INIA) Ministerio de agricultura (2012). Preparación de suelos.
- [Instituto Colombiano Agropecuario, 1977] Instituto Colombiano Agropecuario, M. (1977). Curso sobre hortalizas.
- [Invensense, 2013] Invensense (2013). Mpu-6050 six-axis (gyro + accelerometer) mems motiontracking™ devices.
- [Jaime Pulido Fentanes, 2012] Jaime Pulido Fentanes, Eduardo Zalama, J. G. G.-B. (2012). Plataforma robótica para tareas de reconstrucción tridimensional de entornos exteriores. *ELSEVIER*.
- [Jimenez et al., 2015] Jimenez, A., Medina, M., Acevedo Pérez, O., and Salamanca, J. (2015). Diagnóstico de cultivos utilizando procesamiento digital de imágenes y tecnologías de agricultura de precisión. *INGE CUC*, 11:63–71.
- [Jiménez, 2018] Jiménez, M. F., M. M. F. A. B.-T. R. F. . C. R. (2018). Admittance controller with spatial modulation for assisted locomotion using a smart walker.

- [J.M.Herrero, 2005] J.M.Herrero, X.Blasco, M. J. (2005). Optimal pid tuning with genetic algorithms for non linear process models. *ELSEVIER*.
- [JOHANDER MORA GONZALEZ, 2007] JOHANDER MORA GONZALEZ, R. A. G. M. (2007). Diseño de pids por criterios de control predictivo generalizado.
- [Juan A. Gallego and Pons, 2010] Juan A. Gallego, Eduardo Rocon, J. O. R.-J. C. M. and Pons, J. L. (2010). Real-time estimation of pathological tremor parameters from gyroscope data.
- [Kabir, 2013] Kabir, A., A. A. R. M. . R.-A. (2013). Effect of spacing and sowing time on growth and yield of carrot (*daucus carota* l.). *International Journal of Sustainable Agriculture*.
- [Mack, 1980] Mack, H. J. (1980). Effect of row spacings on processing carrot root yields.
- [Mariana N. Ibarra Bonilla, 2009] Mariana N. Ibarra Bonilla, Fernando J. Quiñones Novelo, I. J. G. E. J. M. R. C. (2009). Desplazamiento de un robot con localización y evasión de obstáculos por visión y ultrasonido. *CONAGOLFO*.
- [MARTÍNEZ, 2016] MARTÍNEZ, R. E. V. (2016). Efecto de la fertilización química y biofertilización biol en la producción del cultivo de zanahoria (*daucus carota* l.) var. royal chantenay.
- [Miguel A. María Malfaz, 2010] Miguel A. María Malfaz, J. F. G. (2010). Toma de decisiones en robótica. *ELSEVIER*.
- [Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural, 2013] Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural (2013). Resolución 1133.
- [Ministerio de Salud, 2012a] Ministerio de Salud (2012a). Resolucion 4142 de 2012.
- [Ministerio de Salud, 2012b] Ministerio de Salud (2012b). Resolucion 4143 de 2012.
- [Ministerio de Salud, 2012c] Ministerio de Salud (2012c). Resolucion 683 de 2012.
- [Ministerio de Salud, 2013] Ministerio de Salud (2013). Resolucion 834 de 2012.
- [MONTAÑA, 2016] MONTAÑA, Z. E. M. (2016). Estudio de mercado para los productos hortícolas del programa de agricultura familiar en el municipio de duitama.
- [Montenegro, 2016] Montenegro, A. F. (2016). Diseño e implementación de un sistema de detección de malezas en cultivos cundiboyacenses.
- [Mostafa, 2013] Mostafa, M. (2013). Pid controller design using genetic algorithm technique. *ICICR*.

- [Murcia, 2006] Murcia, F. J. A. (2006). Proyecto de prefactibilidad para la creación de un centro de acopio de zanahoria en el municipio de simijaca.
- [Napoleón Bernal, 2007] Napoleón Bernal, Guillermo Montealegre, S. I. O. C. L. R. (2007). Efecto de cuatro métodos de labranza sobre las propiedades físicas y la pérdida de suelo en la rotación papa-pastos en áreas de ladera en una región alto andina de colombia.
- [Natalia del Pilar Silva Suárez, 2019] Natalia del Pilar Silva Suárez (2019). Interacción en la marcha asistida con caminador robótico: Evaluación con pacientes en actividades de la vida diaria y la integración de clínicos en el ciclo de control.
- [(NCTU) National Chiao Tung University, 2015] (NCTU) National Chiao Tung University (2015). Modeling of dc motor. *Department of Electrical and Computer Engineering*.
- [Obando, 2014] Obando, R. (2014). Determinación de las unidades agrícolas familiares (uaf) para el desarrollo del departamento de nariño.
- [Octopart, 2010] Octopart (2010). Arduino uno datasheet.
- [P. J. SALTER and FELLOWS, 1979] P. J. SALTER, I. E. C. and FELLOWS, J. R. (1979). The effects of plant density, spatial arrangement and time of harvest on yield and root size in carrots. *Agricultural Science*.
- [P. J. SALTER, 1981] P. J. SALTER, I. E. CURRAH, J. R. F. (1981). Studies on some sources of variation in carrot root weight. *Agricultural Science*.
- [para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (Procisur), 2018] para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (Procisur), P. C. (2018). Manual de agricultura de precisión.
- [Play, 2018] Play, G. (2018). Clinometer.
- [Pollock, 2003] Pollock, M. (2003). *Enciclopedia del cultivo de frutas y hortalizas*. Blume, 1 edition.
- [POVEDA, 2019] POVEDA, D. O. P. (2019). La tecnificaciÓn como herramienta para incrementar la productividad agropecuaria en colombia.
- [Raspberry, 2016] Raspberry (2016). Raspberry pi 3 model b.
- [Reina, 1997] Reina, C. E. (1997). Manejo poscosecha y evaluación de la calidad en zanahoria que se comercializa en la ciudad de neiva.
- [Rojas et al., 2011] Rojas, T., Soto, C., and Rodríguez-Montero, W. (2011). AnÁLisis del crecimiento de cinco híbridos de zanahoria (*daucus carota* l.) mediante la metodologÍa del anÁLisis funcional. *Redalyc*.

- [Saurabh Umkar, 2016] Saurabh Umkar, A. K. (2016). Automated seed sowing agribot using arduino. international conference on communication and signal processing. *IEEE*.
- [Semini, 2017] Semini (2017). Zanahoria: Efecto de la densidad de población en el campo.
- [Shiberu, 2016] Shiberu, T., . T. S. (2016). Effect of intra spacing on yield and yield components of carrot (*daucus carota* l.sub sp. sativus). *Current Research in Agricultural Sciences*, 3(1).
- [(SIC) Superintendencia de Industria y Comercio, 2011] (SIC) Superintendencia de Industria y Comercio (2009-2011). Cadena productiva de las hortalizas en Colombia: Diagnóstico de libre competencia.
- [Somolinos, 2002] Somolinos, J. A. (2002). *Avances en robótica y visión por computador*. Universidad de Castilla- La Mancha, 1 edition.
- [Systems, 2013] Systems, S. (2013). Inertial measurement unit-imu sensor.
- [Tecnológico, 2017] Tecnológico, I. N. (2017). Hortalizas.
- [Unicef, 2018] Unicef (2018). Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América latina y el Caribe.
- [(UNP) Universidad Nacional de la Plata, ] (UNP) Universidad Nacional de la Plata. La raíz de las plantas: Morfología y estructura primaria.
- [Victor H. Andaluz, 2011] Victor H. Andaluz, Flavio Roberti, J. M. T. R. C. B. W. (2011). Adaptive dynamic path following control of an unicycle-like mobile robot. *Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan*.
- [Zaccarian, 2008] Zaccarian, L. (2008). Dc motors: dynamic model and control techniques. *ResearchGate*.