



Diseño, implementación y monitoreo de un prototipo de robot sembrador de trigo

Harold Johann Contreras Calcetero

Andres Felipe Cañón Faustino

10441712250 – 11481719932

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica y Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogota D.C, Colombia

2022

Diseño, implementación y monitoreo de un prototipo de robot sembrador de trigo

Harold Johann Contreras Calcetero

Andres Felipe Cañón Faustino

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

Ingeniero Electrónico e Ingeniero Mecatrónico

Director (a):

PhD., Doctor, Ingeniero Christian Camilo Erazo Ordoñez

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica y Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogota D.C, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
Diseño, implementación y monitoreo de un prototipo de robot
sembrador de trigo,
Cumple con los requisitos para optar
Al título de Ingeniero Electrónico e Ingeniero Mecatrónica.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

I

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
1.1 Estado del Arte	4
1.1.1 Fendt Xaver	4
1.1.2 Agrobot	6
1.2 Planteamiento del Problema	7
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo General.....	9
1.3.2 Objetivos Específicos.....	9
1.4 Justificación	10
2. Marco Teorico	12
2.1. Agricultura de precisión	12
2.1.1. Etapas de la agricultura de precisión	13
2.1.2. Sistemas GPS.....	13
2.1.3. Sistemas GIS	14
2.1.4. Sensores remotos.....	14
2.1.5. Monitores de rendimiento y aplicación	15
2.1.6. Maquinaria inteligente	15
2.2. Robots Móviles.....	15
2.2.1. Configuraciones cinemáticas de los RMR	16
2.3. Planificación de caminos.....	18
3. Metodología	23
3.1. Etapas del proyecto	23
3.1.1. Diseño Mecánico:	23
3.1.2. Diseño Sistema de navegación:	24
3.1.3. Validación de Partes Mecánicas:.....	24
3.1.4. Validación de Sistemas de Control:	24
3.1.5. Construcción del Robot e implementación del sistema de navegación:	24
4. Diseño del Mecanismo	25
4.1. Diseño de mecanismo de sembrado	26

4.1.1. Soporte de piñón cremallera.....	27
4.1.2. Piñón cremallera.....	28
4.1.3. Disco de Perforación.....	29
4.2. Diseño de la estructura del robot.....	32
4.3. Cálculos torque y velocidad (RPM) motor	34
4.4. Construcción del robot.....	35
5. Diseño de Sistema de Navegación y Control.....	38
6. Conclusiones	52
7. Referencias Bibliograficas	55

Lista de Figuras

Figura 1: Fendt Xaver: Robot Agrícola.....	6
Figura 2: Agrobot II: Sembrador de Maíz.....	7
Figura 3: Configuraciones de Robots Móviles.....	16
Figura 4: Diagrama de Bloques PID.....	19
Figura 5: Mecanismo de sembrado.....	26
Figura 6: Soporte del piñón cremallera.....	27
Figura 7: Planos del soporte del pion cremallera.....	27
Figura 8: Piñón cremallera.....	28
Figura 9: Planos piñón cremallera.....	28
Figura 10: Disco de arado.....	29
Figura 11: Planos del disco de arado.....	30
Figura 12: Polea.....	31
Figura 13: Planos de la polea.....	31
Figura 14: Chasis del robot.....	32
Figura 15: Planos del chasis del robot.....	33
Figura 16: Robot ensamblado.....	33
Figura 17: Planos del robot.....	34
Figura 18: Mecanismo de sembrado.....	36
Figura 19: Chasis.....	37
Figura 20: Robot móvil en configuración de triciclo clásico.....	38
Figura 21 : Distancia entre las llantas traseras.....	40
Figura 22: Encoder HC-020K.....	42
Figura 23: Circuito electrónico para el control de trayectoria.....	42
Figura 24: Descripción de los estados del sistema.....	44
Figura 25: Posición Inicial del Robot Móvil.....	44
Figura 26: Posición del Robot Móvil en X.....	45
Figura 27: Posición del Robot Móvil en Y.....	45
Figura 28: Posición del Robot Móvil con el controlador PID.....	46
Figura 29: Motores eléctricos implementados en el robot.....	47
Figura 30: Implementación de Encoder en el robot.....	47
Figura 31. Pulsos del sensor ultrasónico.....	48
Figura 32. Programa del ultrasónico.....	49
Figura 33. Esquema sensor ultrasónico.....	49
Figura 34. Medidas tomadas por el sensor.....	50
Figura 35: Pruebas de robot sembrador de Trigo.....	50

Lista de tablas

Tabla 1: Tipos de variaciones en los diferentes cultivos	12
---	----

Agradecimientos

Agradecemos a todas las personas que formaron parte de este proceso de aprendizaje principalmente a nuestras familias, compañeros y profesores los cuales nos brindaron su mayor apoyo durante los momentos más difíciles de la carrera.

En esta última parte de nuestra grandiosa experiencia queremos agradecer a nuestro director de proyecto por la orientación y la motivación de la misma, de igual manera a la empresa Mycron por formar parte de este gran proyecto aportando su entusiasmo y profesionalismo.

Resumen

En el siguiente trabajo se muestra el diseño de un robot dedicado a la siembra de trigo a través de diferentes herramientas de simulación y lenguajes de programación que permitirán modelar este tipo de sistemas de una manera más sencilla, permitiendo conocer el comportamiento del robot antes de cualquier tipo de implementación física, no obstante este trabajo estara orientado hacia los cálculos necesarios para el diseño de los mecanismos del robot y así mismo un sistema de navegación por medio de un controlador PID que facilitara al robot seguir una trayectoria deseada.

El trabajo se dividirá en dos partes fundamentales que son: la mecánica y la electrónica. Inicialmente se lleva a cabo el diseño mecánico que permitirá al robot ejecutar sus funciones motoras basado en sus dimensiones, materiales de fabricación, forma del robot, tecnología de fabricación, entre otras características las cuales se deben tener en cuenta durante la construcción del robot, de igual manera se plantea un sistema de navegación que permitirá al robot moverse en cualquier posición dentro del terreno de siembra y que le permite realizar las diversas funciones de sembrado de manera más sencilla gracias a la detección de obstáculos y el seguimiento de la trayectoria. Finalmente al momento de calcular y diseñar lo anteriormente planteado se integran ambas partes, tanto la mecanica como la electronica se realizan pruebas experimentales en un area de siembra que permitan evaluar la funcionalidad del robot.

Palabras Clave: Agricultura de precisión, Navegación Autónoma, Diseño mecánico, Sistemas de control y Robótica Móvil.

Abstract

In the following work, the design of a robot dedicated to the sowing of wheat will be developed through different simulation tools and programming languages that will allow to model this type of systems in a simpler way, allowing to know the behavior of the robot before any type of physical implementation, however this work will focus on the calculations necessary for the design of the robot mechanisms and also a navigation system through a PID controller which will be implemented at the time of building the robot.

The work will be divided into two fundamental parts that are: mechanics and electronics. In the first place, the mechanical design will be carried out that will allow the robot to perform its motor functions based on its dimensions, manufacturing materials, robot shape, manufacturing technology, among characteristics which must be taken into account during the construction of the robot, of In the same way, a navigation system will be designed that will allow the robot to have autonomy in any type of terrain that is presented to it when executing its sowing tasks such as obstacle detection, speed control and path tracking, among others. Finally, at the time of calculating and designing the aforementioned, both parts are integrated, both mechanics and electronics, to carry out experimental tests in a planting site in order to evaluate its optimal operation.

Key Words: *Precision Agriculture, Autonomous Navigation, Mechanical Design, Control Systems and Mobile Robotics.*

1. Introducción

En la actualidad la robótica se ha venido desarrollando en gran medida a lo largo de los años, convirtiéndose en un área de estudio muy interesante que ha permitido abordar diferentes problemas tanto a nivel industrial como cotidiano y que, dependiendo el tipo de aplicación o contexto, permitirá integrar o utilizar diversas ramas del conocimiento como lo son: la inteligencia artificial, matemáticas, física, electrónica, mecánica, computación e informática, entre otras. Es importante conocer que existen varios tipos de robots clasificados como móviles, manipuladores y andróides o humanoides que son utilizados tanto a nivel industrial como cotidiano. Desde el punto de vista manufacturero o empresarial el objetivo de comprar robots es intentar reducir costos de fabricación, aumentar la producción de productos de una empresa, interactuar o realizar actividades peligrosas que son un riesgo para un ser humano, brindar una mayor disponibilidad para realizar tareas, mejorar la calidad de cualquier producto y demás aspectos que los convierten en una buena alternativa para la actualidad y el futuro. (Reyes, 2011)

Considerando lo anterior el siguiente trabajo estará orientado hacia la robótica móvil en la agricultura, que durante los últimos tiempos ha venido tomado gran relevancia con varios avances tecnológicos que han permitido generar procesos más eficientes, productivos y precisos. Ahora bien, Colombia es uno de los países con mayor diversidad de suelos que facilita sembrar cualquier tipo de cultivo, y es por este motivo que se desarrolló un prototipo de robot móvil dedicado a la siembra de trigo, una cosecha que ha venido en decadencia y la cual se ha convertido en uno de los productos con mayor importación en el país (Reyes, 2011), con el fin de intentar reducir y aumentar la producción de trigo en el país, por ello se integraran dos áreas de la ingeniería particularmente la electrónica y la mecánica para el diseño de los mecanismos y el sistema de

navegación que permitirán al robot trabajar de manera eficiente durante la ejecución de la actividad.

1.1 Estado del Arte

Durante la planeación y diseño del robot sembrador que se pretende desarrollar a lo largo del trabajo, es necesario investigar y considerar las mejores características de prototipos y proyectos similares que han sido desarrollados a nivel mundial con la finalidad de cumplir de la mejor manera la tarea de sembrado y basado en esto poder elegir, diseñar o construir los mecanismos del robot móvil y el sistema de navegación autónomo que ayuden a consolidar al robot como un prototipo completo a nivel de funcionalidad, ahora bien considerando lo anterior se consideraron los siguientes modelos:

1.1.1 Fendt Xaver

La empresa AGCO/Fendt ha venido desarrollando desde 2017 diferentes proyectos a nivel agrícola, entre los más destacados se encuentra el robot Fendt Xaver que está diseñado para realizar tareas de sembrado a través de un sistema robótico y un modelo inteligente que le permite controlar una flota de vehículos para optimizar el trabajo y la producción al momento de realizar la plantación de semillas.

Este robot cuenta con varias generaciones y diferentes modelos que le han permitido acoplarse al sector agrícola de una manera más sencilla, su último modelo ha causado mayor impacto en el mercado debido a sus múltiples funcionalidades que fueron adquiridas o basadas en sus primeros prototipos donde tiene incorporado un sistema de navegación inteligente controlado por medio de GPS llamado VarioGuide, también cuenta con una plataforma digital que le permite coordinar y sincronizar varios robots al mismo tiempo para agilizar los trabajos en las parcelas de

plantación, esta aplicación se encuentra diseñada en la nube desde el portal FendtONE y puede ser manejada a través de la app Xaver que recibe comandos los cuales le permite controlar los enjambres de robots.

Ahora bien, si se analiza la estructura y las características del Fendt Xaver se puede observar que está compuesto por tres ruedas y solamente una se encarga de la dirección del vehículo, el peso es del vehículo es de 250 Kg con una cantidad de semillas de 20 litros y 150 Kg vacío, cuenta con una capacidad de batería de 2.6 kWh que permiten trabajar alrededor de hora y media continuamente, pero el aspecto más destacable de este robot era la preservación del medio ambiente no utilizando combustibles para su operación, evitando daños en los suelos debido al peso de los vehículos de hasta el 80% y disminución en el uso de productos fitosanitarios. (Fendt, 2021)

Figura 1: Fendt Xaver: Robot Agrícola



Nota. Fotografía de un robot Fendt Xaver dedicado a la siembra de forma coordinada en forma de enjambre. (Fendt, 2021)

1.1.2 Agrobot

Estudiantes de la Universidad Católica de Colombia desarrollaron un prototipo de robot sembrador de maíz considerando la alta demanda de alimentos en Colombia y a la escasez de mano de obra en el sector agrícola.

Su diseño está basado en el proceso y especificaciones de siembra que se deben tener en cuenta al momento de plantar dicha semilla, inicialmente el prototipo está compuesto por un sistema de ruedas tipo oruga que le permiten adaptarse de manera más sencilla a cualquier tipo de terreno, un sensor de humedad que evalúa el terreno y determina si es posible o no comenzar el proceso de siembra, por otro lado, el proceso de perforación está diseñado para que por medio de una broca controlada se pueda lograr una buena distribución de sembrado en el suelo y una buena precisión con respecto a la profundidad de la perforación.

Figura 2: Agrobot II: Sembrador de Maíz



Nota. Fotografía de prototipo de robot implementado por estudiantes de la universidad católica dedicado a la siembra de maíz. (Camilo Bernal, 2015)

1.2 Planteamiento del Problema

A lo largo de los años el sector agropecuario ha tenido un gran aumento en su producción debido al crecimiento de la población mundial que cada vez exige más alimentos para poder abastecerse, en el informe sobre el desarrollo mundial en 2008, Agricultura para el desarrollo, es necesario crear nuevas metodologías de producción agrícola debido a que las estadísticas muestran que es imprescindible que exista una producción del 50% mayor a la que existe actualmente con el único propósito de que las nuevas generaciones se puedan alimentar sin ningún problema. (Washington, 2007)

De acuerdo a la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO), los cereales son el alimento que más se produce en el mundo, debido a que al ser un producto base tiene demasiada importancia en la alimentación de la población mundial ya que permite el desarrollo de diversos productos tales como: pan, sopas, bebidas, arroz, maíz, trigo y soya, entre otros. Al existir gran variedad de cereales en el mundo, a lo largo del trabajo se hablará solamente de uno en particular

y es el trigo que, de acuerdo a los últimos estudios realizados por la FAO sobre la oferta y demanda de cereales, la caída de la producción de este producto es notable y los productores ya se encuentran buscando alternativas para los próximos años con el fin de evitar mayores consecuencias en un futuro. (Washington, 2007)

Por otra parte, en Colombia las exportaciones de trigo son nulas, es decir, no se está produciendo grandes cantidades de trigo, pues de acuerdo a las estadísticas históricas de la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (FENALCE), desde 1950 hasta el 2019 la producción nacional de trigo bajo hasta un 98%, ocasionando que en la actualidad las importaciones sea mucho mayores principalmente desde Canadá y Estados Unidos gracias a los Tratados de Libre Comercio (TLC) que se tienen con dichos países y a su capacidad de producción. (Quintero Rodriguez, Lorena; Lopez González, 2020) Es necesario mencionar que los datos recolectados y expuestos en el documento “Estrategia Colombia Siembra”, realizado por el ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), reafirman que el nivel de importaciones es mucho mayor al nivel de producción nacional hablando específicamente del trigo, continuando a este ritmo se puede provocar que la balanza comercial de Colombia sea negativa (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2016), por otra lado, el presidente de FENALCE Henry Vanegas dice: “En el año 2019 fue producido trigo en Colombia por pequeños cultivadores en Nariño y Boyacá únicamente para platos gastronómicos del país, el resto de los productos fueron fabricados a base de trigo importado”, palabras poco alentadoras en el sector agrícola y comercial en Colombia.

Ahora bien, cambiando de tema y hablando de la tecnología implementada en el sector rural en Colombia, se puede observar que se presenta una gran limitación de recursos, porque a

pesar de que existen varios proyectos similares que se encuentran en desarrollo, es complicado o demasiado complejo realizar su construcción e implementación en la zona porque son altos costos de cada uno de los elementos que componen al robot. Del mismo modo es importante considerar en caso de diseñar o fabricar algún robot, tener en cuenta las condiciones del lugar y ambientales con el objetivo de que se adapte y no presente problemas en este tipo de regiones, por eso para este proyecto es indispensable que se cuente con un sistema autónomo de navegación que permita adaptarse a cualquier sitio de manera sencilla y rápida durante su desplazamiento, conociendo además con certeza los elementos que se utilizarán para la construcción del robot móvil sembrador de trigo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema mecánico y de navegación autónomo para un prototipo de robot sembrador de trigo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre los diferentes dispositivos electrónicos y mecánicos que faciliten y se adapten a las necesidades del robot basado en algunos requerimientos mínimos.
- Diseñar un mecanismo por medio de *SolidWorks* que permita desarrollar la respectiva tarea de siembra que ejecutara el robot.
- Proponer un sistema de navegación que permita al robot moverse de manera autónoma en cualquier lugar donde vaya a realizar el trabajo de siembra.

- Implementar e integrar los diseños del mecanismo y el sistema de navegación para la construcción del robot.

1.4 Justificación

La producción de trigo en Colombia no se produce en gran medida debido a la gran demanda que exige el país, sin contar con que Estados Unidos desde 1953 se ha vuelto un productor muy sólido en el mundo hasta generar una sobreproducción de trigo en su país, lo cual ha traído como consecuencia un desequilibrio comercial con los productores de los países medianos y pequeños, por eso Colombia tiene su TLC con Canadá y Estados Unidos para importación de trigo, cabe mencionar que también al existir poca inversión en el sector rural es difícil llegar a disminuir o igualar el nivel de importación de trigo en el país.

A pesar de ello el propósito del proyecto es lograr contrarrestar la problemática planteada por medio de un prototipo de robot encargado de realizar la siembra de semillas de trigo, con la intención de aumentar la productividad, potenciar las tierras y aumentar la competitividad en los mercados internacionales. Es sencillo realizar lo anterior, tomando en consideración que Colombia cuenta con una gran diversificación de climas, cultivos, recursos hidrográficos y otros aspectos que permiten desarrollar sistemas inteligentes que sean flexibles y adaptables frente a otros tipos de máquinas. En la actualidad existen varios robots a nivel mundial, dedicados exclusivamente a realizar siembra, recolección y cuidado de plantas y/o alimentos, no obstante Colombia sigue sin incorporar de manera profunda la tecnología en el campo agrícola, por este motivo es importante desde la rama de la ingeniería, diseñar sistemas que permitan generar un impacto y un desarrollo en el área, siendo fundamental trabajar en equipo desde diferentes carreras para conseguir perspectivas multidisciplinarias para poder resolver la problemática.

Es importante mencionar que en Colombia han sido desarrollados prototipos o sistemas de navegación que pueden ser implementados para la siembra de alimentos como: "Agrobot II: Sembrador de Maíz", "Diseño e implementación de un sistema para el mapeo y navegación de un robot móvil", "Aproximación al desplazamiento de una plataforma móvil, tipo robot agrícola, entre otros. Ahora bien, si se toman las características y funcionalidades más importantes de cada uno de los modelos o proyectos, se obtendrá como resultado un robot completo e íntegro que permitirá obtener un mayor rendimiento respecto a los demás prototipos, es preciso resaltar que se implementará un sistema con un enlace de datos a la nube que permitirá monitorear el estado del cultivo.

2. Marco Teorico

2.1. Agricultura de precisión

Es un sistema empleado para analizar y controlar la variación espaciotemporal del terreno y el cultivo. La variación espacial comprende las diferencias de fertilidad y las diferentes plantas que se dan entre distintos terrenos sobre los que va a implementar. La variación temporal abarca las diferencias en la producción de un mismo terreno entre una temporada y otra.

Tabla 1: Tipos de variaciones en los diferentes cultivos

Tipo de variación	Sujeto de la variación	Factores involucrados
Espacial	Fertilidad del suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones fisicoquímicas (como pueden ser el pH o acidez-alcalinidad, y el contenido de metales o de nitrógeno). • Contenido de humedad, materia orgánica y contaminante. • Conductividad hidráulica y eléctrica. • Profundidad, fuerza mecánica y Textura. • Salinidad. • El relieve o topografía del ambiente. • Bacterias y fauna del suelo
	Desarrollo vegetal	<ul style="list-style-type: none"> • Maleza (plantas oportunistas). • Plagas (insectos, virus y microorganismos). • Características genéticas del cultivo (como la resistencia a la sequía y velocidad de desarrollo)
Temporal	Cosecha	<ul style="list-style-type: none"> • Variación de productividad entre períodos distintos de siembra. • Clima (por ej. radiación solar o humedad ambiental) entre otras distintas temporadas.

Nota. Se describe en la tabla las variaciones espaciales y temporales en distintos tipos de cultivos, analizando la fertilidad, cambios de una temporada a otra y producción del cultivo. (INCyTU, 2018)

La agricultura de precisión maneja y administra las variables como los insumos eficientemente, como por ejemplo agua o fertilizantes. Logra un mayor equilibrio al minimizar los recursos invertidos y el impacto ambiental y a la vez maximiza la producción del cultivo. (INCyTU, 2018)

2.1.1. Etapas de la agricultura de precisión

- **Recolección de datos:**

Esta etapa se lleva a cabo con cámaras, equipos y sensores especializados para tomar dimensiones y características del terreno.

- **Análisis de datos:**

Un experto toma los datos y los analiza para determinar adecuadamente el manejo de la variación espaciotemporal detectada en la recolección de datos.

- **Implementación:**

El productor guiado por la AP cultiva el terreno según las especificaciones dadas.

2.1.2. Sistemas GPS

El GPS es un sistema que fue desarrollado por el ejército de los Estados Unidos, con el fin de brindar posicionamiento y navegación global ya que estos realizan sus operaciones en terrenos selváticos en los cuales no es fácil ubicarse por surgió la necesidad de crear dicho sistema. El GPS lo constituyen tres segmentos los cuales son el espacial, de control, y de usuario.

El segmento espacial lo conforma una formación de 24 satélites. El segmento de control está formado por estaciones ubicadas en distintos puntos del planeta. El segmento de usuario está

representado por todos los equipos que en funcionamiento son receptores de señal satelital, un ejemplo muy común puede ser un celular. (A.Pozo-Ruz* et al., 2016)

En la agricultura de precisión el GPS ha permitido registrar los variables espacios temporales y controlar con precisión geográfica las diferentes maquinarias agrícolas que cuentan con pilotos automático o sistemas de navegación.

2.1.3. Sistemas GIS

Son sistemas usados para almacenar, visualizar y analizar datos obtenidos geográficamente. En la agricultura de precisión estos sistemas nos ayudan a analizar la información obtenida mediante diferentes herramientas que captan las variables, un ejemplo de estas herramientas, puede ser un sensor de humedad el cual se introduce en la tierra y mide la humedad y el PH del terreno, estos datos obtenidos permiten tomar decisiones sobre el manejo de la variabilidad espacio temporal del terreno.

2.1.4. Sensores remotos

Son sistemas satelitales o portátiles que obtiene información sin la necesidad de tener contacto físico con el terreno, se emplean en la recolección de datos sobre la administración del agua de riego, vigor de las plantas, enfermedades vegetales, mapeo de malezas. Para ser eficientes estos sensores deben estar bien calibrados y tener la suficiente resolución según el trabajo que ven a desempeñar.

Otra forma de captar datos remotamente es la fotografía, que se puede llevar a cabo vía satelital o aérea por medio de drones o aviones.

2.1.5. Monitores de rendimiento y aplicación

Los monitores de rendimiento obtienen información sobre la cantidad y calidad de los cultivos, como puede ser los granos cultivados por unidad de tiempo y la humedad del terreno y la producción. Los monitores de aplicación se usan para determinar la cantidad de insumos por cada parte del terreno, como puede ser la dosis de semillas que se van a cultivar.

2.1.6. Maquinaria inteligente

En la agricultura se cultivan diferentes tipos de productos, la cosecha de estos requiere una ardua labor manual por parte de los trabajadores que mantienen estos terrenos, lo que incrementa los gastos de producción. Se ha desarrollado maquinaria inteligente capaces de realizar todo tipo de tareas que se requieren para mantener un cultivo, como cosechadoras inteligentes capaces de diferenciar entre frutos maduros e inmaduros, sistemas de detección de flores en árboles frutales, que estiman su producción, la aplicación de químicos y recolección automatizada de frutos, sistemas de navegación o piloto automático que controlan maquinaria agrícola vía DGPS.

2.2. Robots Móviles

Un robot móvil se define como un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma sin estar sujeto físicamente a un solo punto, posee sensores que permiten monitorear su posición relativa con respecto a su punto de origen y a su punto de destino. Su desplazamiento es proporcionado mediante dispositivos de locomoción tales como ruedas, patas, orugas, etc.

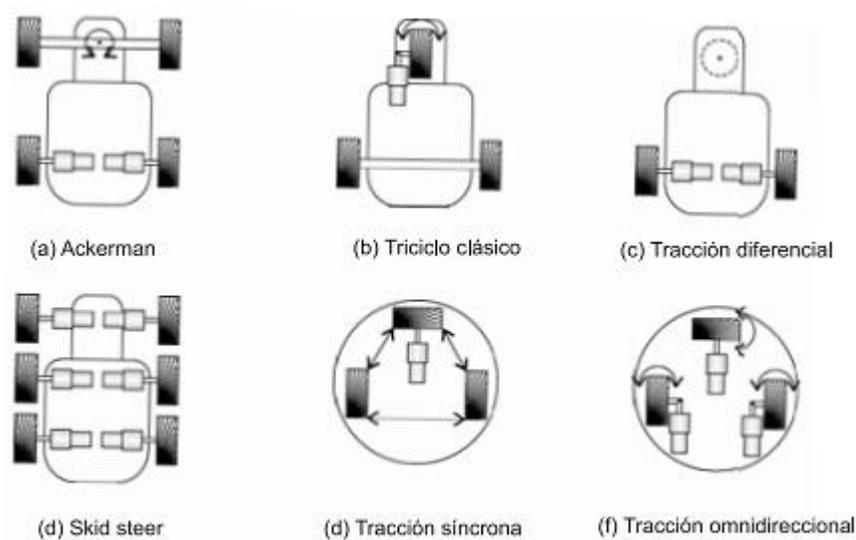
Los robots móviles se clasifican por el tipo de locomoción utilizado; en general, los tres medios de movimiento son: por ruedas, por patas y por orugas. Si bien la locomoción por patas y orugas ha sido ampliamente estudiada, el mayor desarrollo está en los Robots Móviles con Ruedas (RMR), esto es debido a las ventajas que presentan las ruedas respecto a las patas y a las orugas.

Algunos de los atributos más importantes de los RMR, destacan su eficiencia en cuanto a su energía al desplazarse en superficies lisas y firmes, no generan desgaste en la superficie sobre la que se mueven, no requieren un gran número de partes para su construcción, además normalmente estas son menos complejas con respecto robots de patas y orugas, lo que permite una construcción mucho más sencilla y rápida.

2.2.1. Configuraciones cinemáticas de los RMR

Existen diferentes tipos de cinemáticas para los RMR, aunque de manera general se tienen las siguientes configuraciones:

Figura 3: Configuraciones de Robots Móviles



Nota. Tipo de configuraciones de robots móviles en los cuales se observa el tipo de locomoción con el tipo de ruedas más comunes. (World Eben, 2021)

2.2.1.1. Locomoción diferencial:

En esta locomoción los cambios de dirección se realizan modificando la velocidad de las ruedas según como se desee girar, es decir, si se quiere girar a la izquierda o a la derecha, estos sistemas diferenciales tienen la ventaja de que son baratos, fáciles de implementar y su diseño es

muy simple, pero como contrapunto se tiene la desventaja de que son sistemas difíciles de controlar, incluso en trayectorias rectas, donde se requiere un control de precisión, además con el tiempo los neumáticos tienden a desgastarse y esto afecta el sistema de forma directa ya que al cambiar el diámetro de las ruedas esto causa una distorsión en el sistema de control de dirección del vehículo.

2.2.1.2. Locomoción síncrona:

En esta locomoción todas las ruedas se mueven de forma síncrona todas actuadas por el mismo motor, también hay sistemas de dos motores los cuales disponen un motor para la translación y otro para la rotación.

Estos sistemas destacan por que al tener dos motores separados simplifican mucho el sistema ya que al tener un motor para la translación el control en línea recta está garantizado mecánicamente, pero a su vez estos sistemas tienen la desventaja de que su diseño es muy complejo por lo tanto no son fáciles de implementar.

2.2.1.3. Triciclo clásico

Los triciclos cuentan con tres ruedas de las cuales una de las tres da la dirección del robot, estos cuentan con la ventaja que no sufren desplazamiento, su gran desventaja es que esta locomoción requiere un sistema de guiado no holónimo

2.2.1.4. Locomoción Ackerman:

Estos sistemas al igual que los diferenciales son fáciles de implementar, y el sistema direccional es simple y está formado por 4 barras, aunque tienen la desventaja de poseer restricciones holónomas.

2.2.1.5. Locomoción Omnidireccional:

Estos sistemas poseen un diseño complejo que a la vez nos permite una mayor libertad de movimiento que los sistemas de ruedas clásicos.

Una de las ventajas principales de estos sistemas es que nos permite movimientos complicados reduciendo las restricciones cinemáticas.

El mayor inconveniente que presentan es que el movimiento en línea recta no está garantizado por restricciones mecánicas, por lo que precisan de control. Otra desventaja es que la implementación es bastante complicada. (Barrientos Sotelo & García Sánchez, José Rafael; Silva Ortigoza, 2007)

2.3. Planificación de caminos

En el ámbito de la robótica, la necesidad de perfeccionar las rutas de desplazamiento o bien conocido como Path Planning ha sido siempre un objetivo destacado en numerosas investigaciones.

Los nuevos desarrollos que se llevan a cabo buscan dotar al robot de una gran autonomía, consiguiendo así que pueda desplazarse por su espacio operativo sin necesidad de que intervenga el programador, dando soluciones, de forma autónoma, a situaciones imprevistas o estableciendo tareas personalizadas bajo demanda del operador.

Los criterios para evaluar que una planificación de caminos sea adecuada son complejidad, el algoritmo es demasiado costoso, en espacio almacenamiento y diseño, representar correctamente el terreno, representar correctamente las limitaciones del robot. (Barrientos Sotelo & García Sánchez, José Rafael; Silva Ortigoza, 2007)

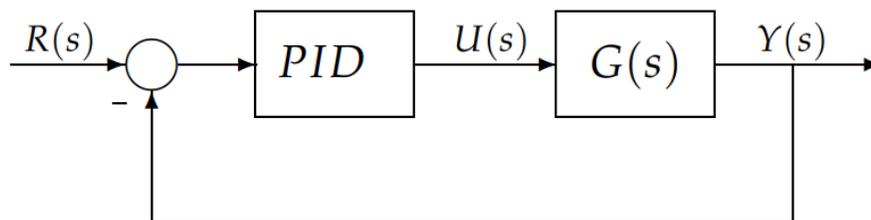
2.4. Controladores PID

Es un dispositivo de control por Feedback largamente usado en sistemas de control industrial. Dicho mecanismo calcula el error entre un valor medio y un valor al que se quiere llegar.

El algoritmo del control PID radica en tres parámetros diferentes: el proporcional, el integral, y el derivativo. El Proporcional está sujeto de la desviación actual. El Integral está sujeto a los errores anteriores y el Derivativo es un pronóstico de los errores futuros. El conjunto de estas tres acciones es usado para ajustar al proceso por medio de una variable de control como la posición de un efector final en un robot articulado o el nivel de agua un tanque en sistema de control de nivel.

Ahora tal y como se muestra en la figura 4 se observa el diagrama de bloques de un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad. (Mazzone, 2002)

Figura 4. Diagrama de Bloques PID



Nota. En la figura 4 se observa el diagrama de bloques para la implementación del control PID en lazo cerrado. (Mazzone, 2002)

A continuación, la familia de controladores PID, entre los cuales están estas tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son conocidos como P, I, PI, PD y PID.

2.4.1. Control de Acción Proporcional:

Saca una señal de salida que es proporcional a la desviación actual, es decir: $u(t) = K_p e(t)$ que descripta desde su función transferencia queda:

$$Cp(s) = K_p \quad (1)$$

Donde K_p es una ganancia que se puede ajustar. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero tiene una labor limitada y desviación en régimen constante (off-set).

2.4.2. Control de Acción Integral:

Saca una señal que es proporcional a la desviación acumulada, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int e(\tau) d\tau \quad Ci(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

El control da una señal $u(t)$ que tiene un valor distinto de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Con esto se concluye que, al tener una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen constante es cero.

2.4.3. Control de Acción Proporcional-Integral

Se determina como:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

T_i se determina como tiempo integral y ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista un error para que tenga una acción de control diferente de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este pensamiento es sencillo ya que muestra el error en régimen constante en todo momento será cero.

Gran parte de los controladores industriales tienen únicamente acción PI. Se puede justificar que un control PI es acertado para todas las operaciones donde la dinámica es necesariamente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

2.4.4. Control de acción proporcional-derivativa:

Se determina como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + s K_p T_d \quad (6)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del

error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

2.4.5. Acción de control proporcional-integral-derivativa:

Esta acción de control en conjunto agrupa las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

y su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

3. Metodología

La metodología que se implementara para el diseño del sistema de navegación para el robot sembrador, estará orientada hacia un estudio descriptivo que permitirá analizar por medio de un sistema de navegación para manejar la trayectoria del robot móvil, cabe señalar que para que se cumpla dicho objetivo es importante describir todos los elementos o conceptos elementales que se utilizaran para el diseño del robot como sensores, robótica móvil, sistema de navegación, diseño de mecanismos, cálculo de piezas, microcontroladores, tipo de material, técnicas de navegación, etc.

Inicialmente para el desarrollo de las etapas que facilitaran el diseño del robot, se investigara cada uno de los conceptos o elementos anteriormente mencionados a través de artículos relacionados con el tema, libros de diferentes áreas como sistemas de control, máquinas y mecanismos, sistemas digitales, entre otros. Adicionalmente, es necesario investigar sobre el sistema de sembrado y cuidado del trigo por medio de conferencias relacionadas al tema o revistas que expliquen el proceso que se desea ejecutar. Una vez se tiene definida la problemática y los componentes con los que se van a utilizar para fabricar el robot se proceden a realizar pruebas para cada uno de elementos, comprobando su funcionamiento para poder así ensamblar todas las partes del robot y validar su comportamiento en general con el fin de realizar los ajustes necesarios.

3.1. Etapas del proyecto

3.1.1. Diseño Mecánico:

Inicialmente se partirá del diseño mecánico del robot donde se indicará el tipo de material que conformará la carrocería del robot, la descripción geometría del mecanismo, diseño de las piezas que mejor se adapten al robot con el fin de que logre desplazarse sin dificultad en el área de

cultivo, asimismo los cálculos dinámicos, mecanismo de perforación para el sembrado de la semilla, etc.

3.1.2. Diseño Sistema de navegación:

Es importante para evitar los obstáculos utilizar un sensor ultrasónico, para después diseñar el control que permita definir la trayectoria que debe seguir el robot durante la siembra ya que considera la señal de error durante el proceso que lo permite ser más robusto frente a otro tipo de controladores.

3.1.3. Validación de Partes Mecánicas:

A través del software de diseño mecánico *SolidWorks*, una vez de tener calculados los eslabones, articulaciones y las piezas mecánicas diseñadas de las que se compondrá el prototipo, se realiza el ensamblaje del mismo con el fin de validar el resultado final, a partir de allí se tendrán en cuenta las restricciones o limitaciones durante el ensamblaje.

3.1.4. Validación de Sistemas de Control:

Por medio del programa de cómputo numérico Matlab, se procede a validar los resultados del controlador comprobando que se cumplan las especificaciones planteadas.

3.1.5. Construcción del Robot e implementación del sistema de navegación:

Finalmente, al comprobar los aspectos básicos por medio de simulación, se procede a ejecutar el ensamblaje de los componentes que formaran parte del robot, así como la respectiva configuración del sistema de navegación, validándolo por medio de pruebas experimentales.

4. Diseño del Mecanismo

Esta sección se basa en el desarrollo del proyecto, usando el método de diseño, se conoce como Ingeniería Concurrente. Esta técnica es considerada como un nuevo método orientado a entrelazar distintos procesos, interdisciplinarios, sistemáticamente y de forma paralela, para el diseño y desarrollo de productos.

El diseño del prototipo recapitula los cálculos de diseño del robot y sus respectivas piezas, pasando por la elección de materiales, motores, componentes electrónicos y el suministro de energía.

La programación de los algoritmos de control de los diferentes motores, vinculados a movimiento de desplazamiento, conteo y fijación. La interpretación de las señales reaccionadas a los sensores para la evasión de obstáculos y la contabilización de granos a sembrar.

Se realizó el diseño de la estructura y control del robot sembrador considerando ciertos parámetros para el diseño, como:

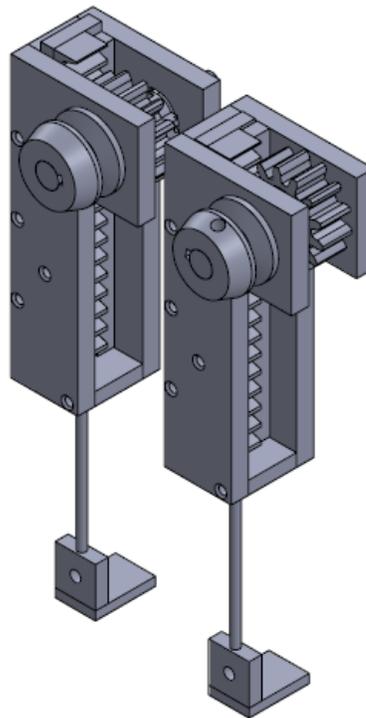
- Las dimensiones del robot en el de cultivo ya que para sembrar se necesitan medidas específicas al realizar el arado.
- Potencia y torque de los motores que van a mover y soportar al robot.
- Capacidad del mecanismo de remover la tierra y volverla a colocarla después de sembrada la semilla, así como la capacidad de soportar el esfuerzo al introducirse en la tierra y formar el surco.
- Distancia y recorrido que va a realizar el robot a través del cultivo, teniendo en cuenta obstáculos que puedan presentarse a través de la trayectoria a realizar.

- Materiales resistentes a golpes y terrenos difíciles de transitar como lo son los cultivos.

4.1. Diseño de mecanismo de sembrado

Para concebir este diseño se tuvieron en cuenta aspectos como realizar el sembrado en un solo recorrido, un óptimo arado y tapado de las semillas para realizar la siembra lo mejor posible.

Figura 5: Mecanismo de sembrado



Nota. Vista isométrica del mecanismo de sembrado totalmente ensamblado (propio).

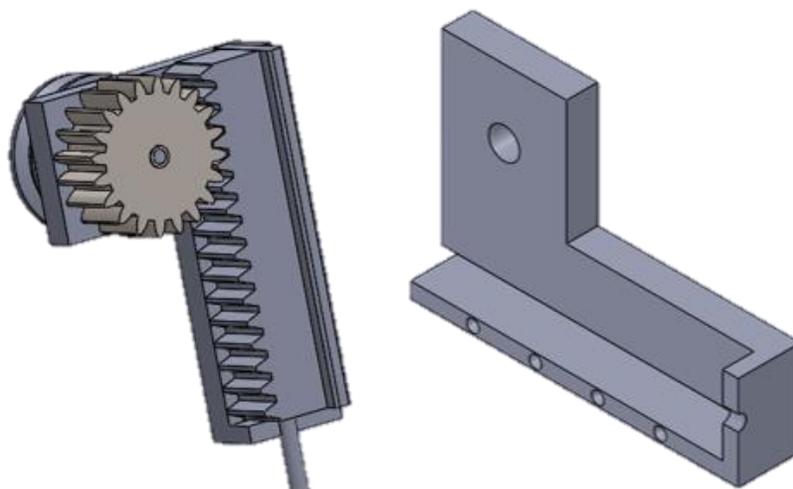
Para este diseño el mecanismo consta de dos piñones con cremallera que son movidos por un solo motor conectado por una polea que acciona el mecanismo, también cuenta con un disco el cual realizara la función del arado de la tierra, seguido del disco se encuentra una compuerta controlada por un servomotor el cual dejara caer las semillas de manera intermitente en el surco creado por el disco, se encontrara una pala que realizara la función de tapar la semillas con la

misma tierra que el disco va apartando, finalmente se colocó un rodillo para aplanar la tierra y así mejorar el resultado del sembrado.

4.1.1. Soporte de piñón cremallera

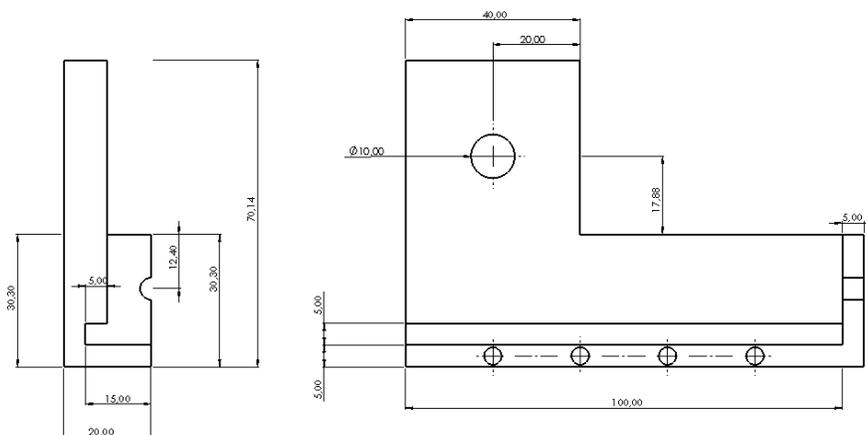
Se construyó un soporte que cumpliera la función de contener el mecanismo de piñón cremallera que desplaza el disco y la pala.

Figura 6: Soporte del piñón cremallera



Nota. Vistas isométricas del soporte del mecanismo de piñón cremallera. (Propia)

Figura 7: Planos del soporte del pion cremallera

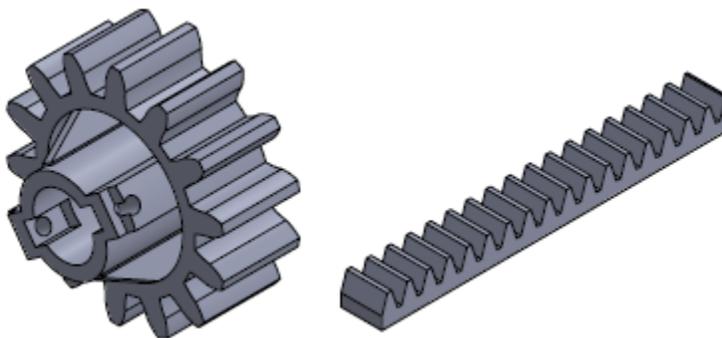


Nota. Planos donde se evidencian las medias del soporte del mecanismo (Propia).1

4.1.2. Piñón cremallera

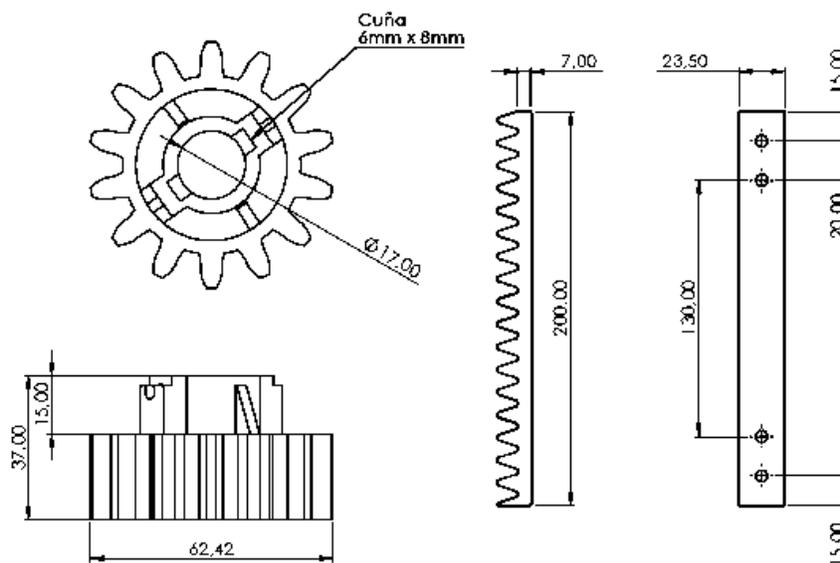
La cremallera se diseñó con un vástago incrustado el cual soporta el motor, el disco y la pala, esto permitirá tener estas piezas fijas y activar o desactivar el disco y la pala a la hora de realizar el sembrado.

Figura 8: Piñón cremallera



Nota. Vistas isométricas de piñón y cremallera (Propia).

Figura 9: Planos piñón cremallera



Nota. Planos donde se evidencian las medias del piñón cremallera (Propia).

Se seleccionó un piñón con un módulo de 2, de 20 dientes, Angulo de presión de 20 y un paso de 40 mm, así mismo se seleccionó una cremallera con el mismo modulo y se calculó la velocidad de avance para dar el tiempo en que se demora el mecanismo en activarse o desactivarse, para esto primero se calcula el avance de la rueda:

$$D_p = \text{diametro primitivo}$$

$$z = \text{numero de dientes del piñon}$$

$$A = D_p * z \tag{1}$$

$$A = 40 \text{ mm} * 20 = 80 \text{ mm}$$

Para calcular la velocidad de avance, se sabe que se va a configurar un motor a 10 RPM entonces

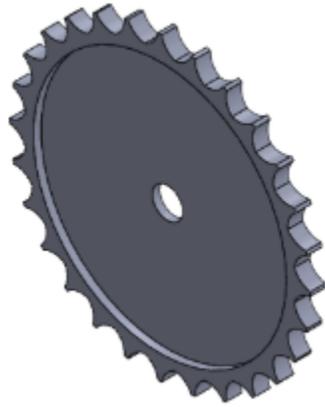
$$V_A = N * A \tag{2}$$

$$V_A = 80 \text{ mm} * 10 \text{ rpm} = 800 \text{ mm/min}$$

4.1.3. Disco de Perforación

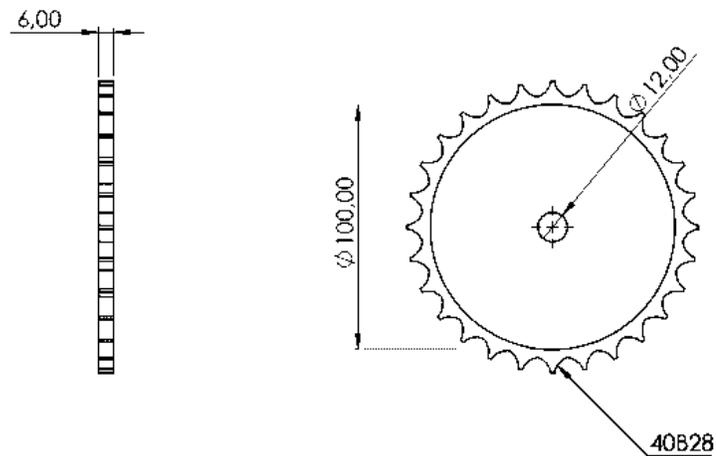
Se diseñó un disco tipo sierra con topes en las puntas que al entrar en la tierra se realice un arado de 14 mm de ancho en el cual entraran la semillas, se seleccionó el material en aluminio ya que este es liviano y a la vez soporta el esfuerzo mecánico.

Figura 10: Disco de arado



Nota. Vista isométrica del disco de arado (Propia).

Figura 11: Planos del disco de arado

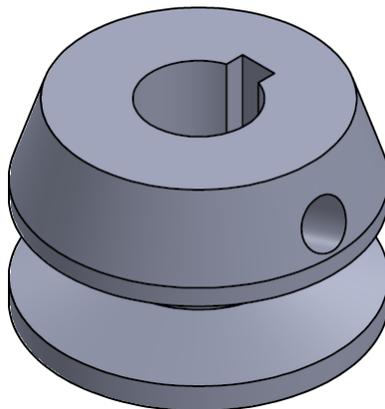


Nota. Planos donde se evidencian las medias del piñón cremallera (Propia).

4.1.4. Polea 50 mm

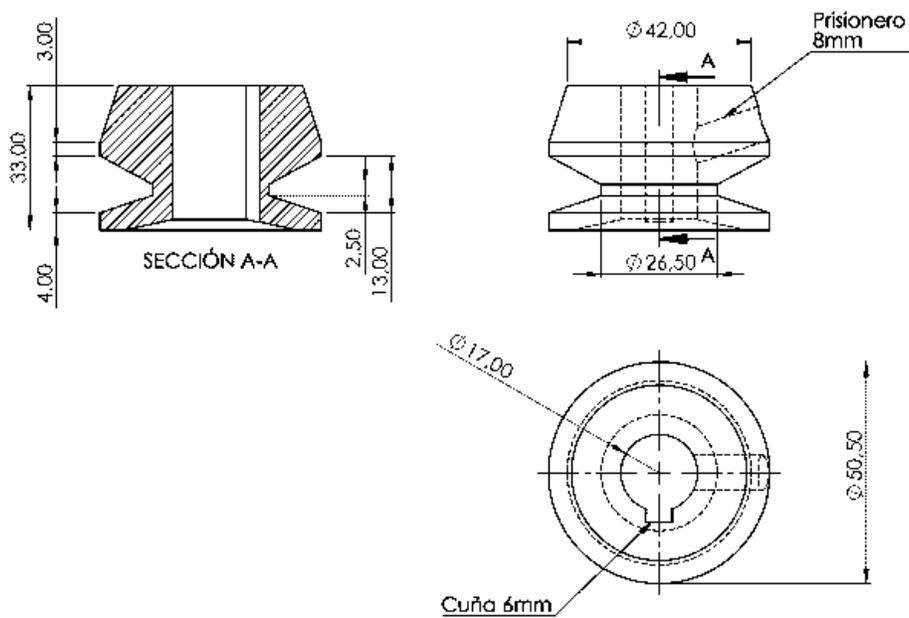
Se diseñó una polea para colocar a cada uno de los dos soportes que va a tener el mecanismo de sembrado para así poder mover ambos piñones con un solo motor, conectando ambas poleas por medios de una correa, y así ahorrar espacio en el chasis del robot y mover ambas cremalleras con un solo motor.

Figura 12: Polea



Nota. Vista isométrica del disco de arado (Propia).

Figura 13: Planos de la polea

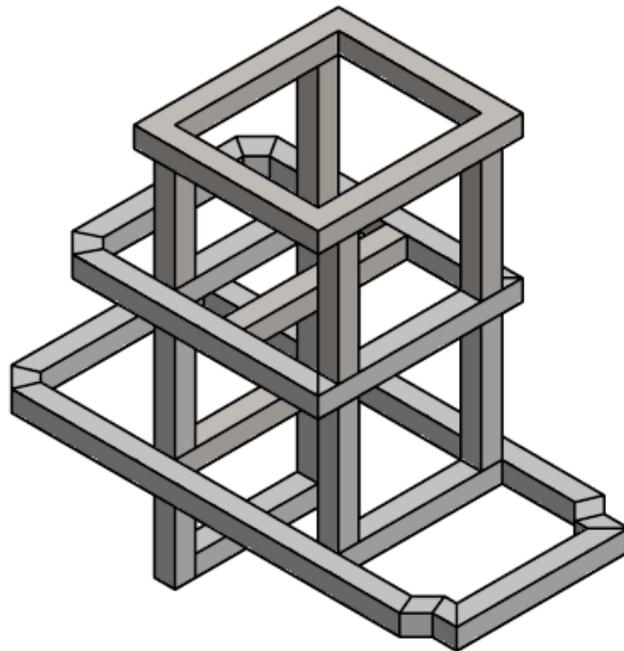


Nota. Planos donde se evidencian las medias de la polea (Propia).

4.2. Diseño de la estructura del robot

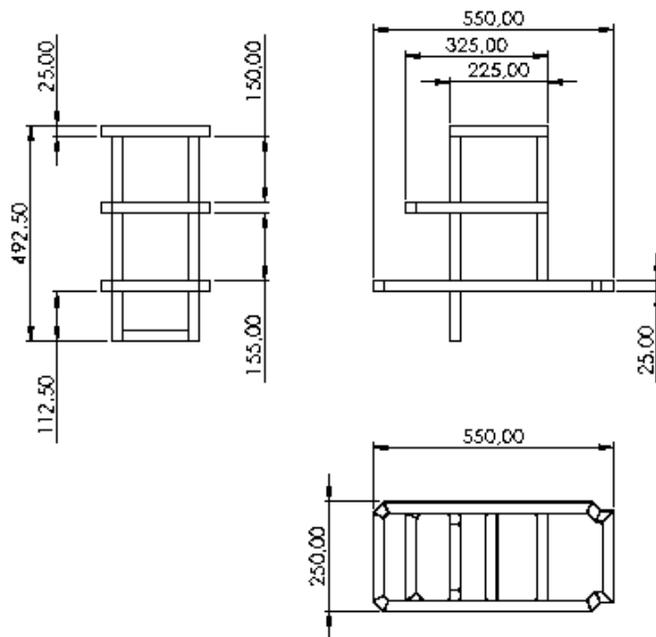
La estructura se diseñó con los espacios en donde se colocan los diferentes componentes electrónicos que se usaron para la construcción del robot, como por ejemplo, el controlador, los motores, el mecanismo de sembrado, las ruedas y el tanque que va a contener las semillas.

Figura 14: Chasis del robot



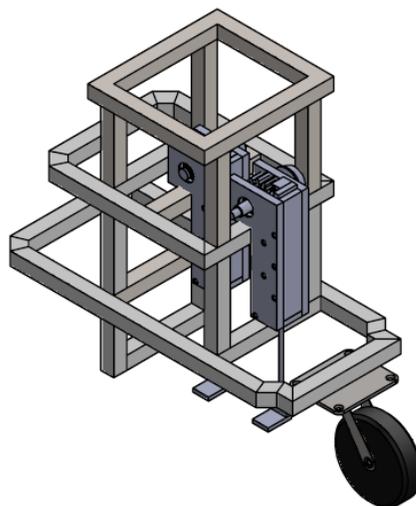
Nota. Vista isométrica del chasis del robot (Propia).

En el proceso de diseño se quiso dar la geometría de un tractor, por otra parte, se utilizaron tubos rectangulares para dejar espacio al colocar por dentro todos los componentes que se mencionaron anteriormente, al terminar, se definieron las siguientes dimensiones a la estructura del robot:

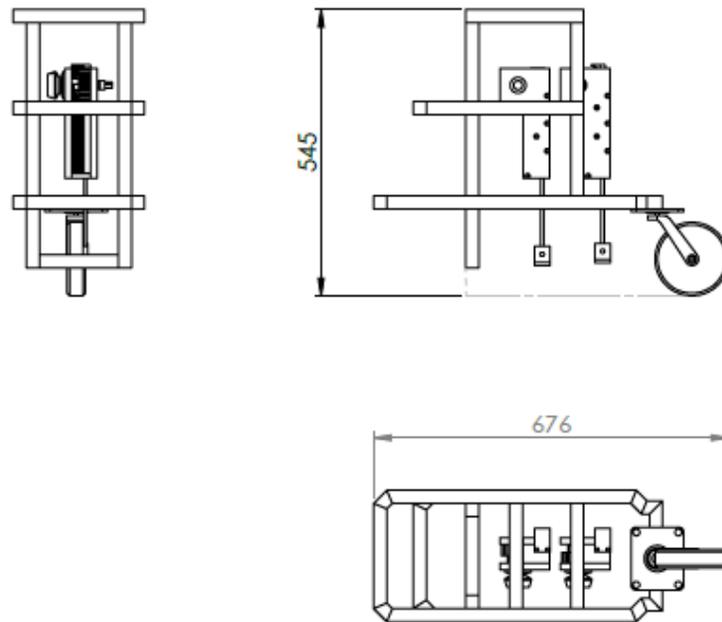
Figura 15: Planos del chasis del robot

Nota. Planos donde se evidencian las medias del chasis (Propia)

Se terminó el ensamblaje CAD del robot en SolidWorks y se procedió a la construcción física del robot.

Figura 16: Robot ensamblado

Nota. Vista isométrica del chasis del robot (Propia).

Figura 17: Planos del robot

Nota. Planos donde se evidencian las dimensiones del robot (Propia).34 5

4.3. Cálculos torque y velocidad (RPM) motor

Primero se calculó el torque de los motores con la siguiente ecuación:

$$\text{Torque}(Nm) = \mu \cdot N \cdot r \quad (3)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción entre las ruedas y el suelo r es el radio de las ruedas y N es el peso que actúa en las ruedas. Para determinar N se tomó el robot ya construido y peso en una báscula, luego se realizó la conversión, ya teniendo las unidades 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. Reemplazando los datos en la ecuación se obtiene un torque en Nm

$$\text{Torque}(Nm) = 0,2 \cdot \frac{25 \text{ Kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{2} \cdot 0,05 \text{ m} = 1,23 \text{ Nm}$$

El torque también se puede dar en kg/cm, se realiza la conversión:

$$1 Nm \rightarrow 10,19716 kg/cm$$

$$1,23 Nm \rightarrow x$$

$$x = 12,54 Kg/cm$$

Teniendo en cuenta la distancia que debe recorrer el prototipo, 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 sobre llevar las irregularidades del terreno sin que se sobre esfuercen o se dañe.

4.4. Construcción del robot

Teniendo el diseño de cada una de las partes por medio del software de dibujo asistido SolidWorks y definido cada una de las medidas de la estructura del robot, se procede a construir el móvil:

Figura 18: Mecanismo de sembrado



Nota. Mecanismo de sembrado ensamblado completamente (Propia).

En la imagen anterior se puede ver el mecanismo ensamblado en su totalidad, en el soporte, se puede ver que cumple con las características del diseño, como se instaló el motor paso a paso que moverá con precisión el mecanismo, el vástago del motor que va empotrado a uno de los dos piñones, la polea que esta fija al piñón, esta va conectada por una correa a la otra polea para de esta manera mover ambos piñones cremallera con un solo motor.

Figura 19: Chasis



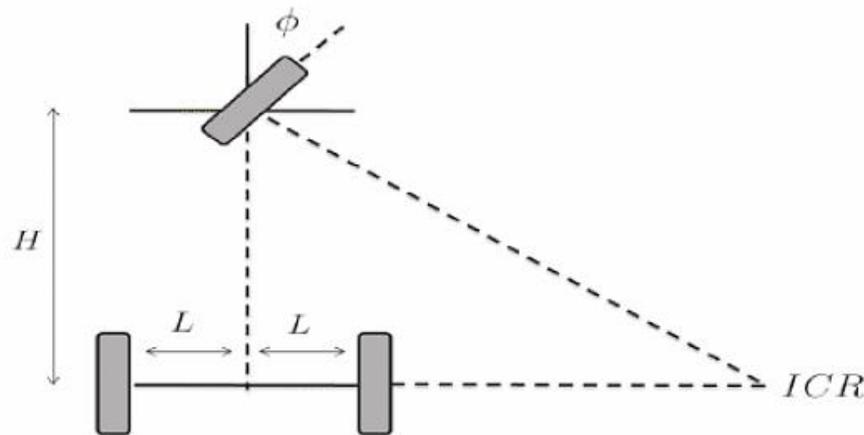
Nota. Chasis del robot completamente construido (Propia).

El siguiente paso fue construir el chasis, para el cuál se utilizaron varillas rectangulares en acero, y se dio la geometría de un tractor para presentación del robot.

5. Diseño de Sistema de Navegación y Control

Los robots móviles pueden presentar distintos movimientos en sus trayectorias dependiendo el tipo de rueda que se utilice, ya que estas les brindan ciertas características y limitaciones durante el desplazamiento del robot y es por ello por lo que para este caso se utilizara un robot sobre dos ruedas fijas y una rueda giratoria que permitirán al móvil tener una mejor movilidad con respecto a otras configuraciones. A continuación, se verá la distribución de las ruedas de forma delta que permite tener una base estable y una buena maniobrabilidad con su llanta giratoria, esto se hace con el fin de determinar el mejor modelo matemático para el diseño del mismo:

Figura 20: Robot móvil en configuración de triciclo clásico



Nota. Descripción de la configuración de triciclo compuesta por una rueda giratoria y dos ruedas fijas que buscan darle estabilidad al robot. (Propia)

Sin embargo, el enfoque del trabajo estará más detalladamente en el diseño del control para el seguimiento de trayectorias y la detección de obstáculos para que permitan desplazar al robot de manera mucho más precisa en cualquier tipo de terreno. Principalmente el objetivo es lograr

que el robot móvil siga una trayectoria de referencia de manera estable, sin embargo, es posible que se lleguen a presentar diversos problemas o limitaciones al momento de implementarlo.

Inicialmente se calculará el modelo matemático del robot móvil deduciendo las variables de entrada y salida descritas en el espacio (x, y). Para ello se tendrá en cuenta el radio de la llanta (r), la velocidad angular (ω) y la velocidad tangencial (V_{TAN}) y tienen la siguiente relación:

$$V_{TAN} = \omega * r \quad (4)$$

Para calcular la velocidad total del carro se debe tener en cuenta la velocidad de cada una de las llantas y se expresa de la siguiente manera:

$$V_{Total} = V_x = V_y = \frac{V_{Left} + V_{Right}}{2} \quad (5)$$

Sin embargo, la ecuación anterior solo describe la velocidad con respecto a un único eje por lo que es necesario considerar un ángulo θ , que permita considerar el movimiento en ambos ejes en el espacio, por lo tanto, la velocidad se modelaría de la siguiente manera:

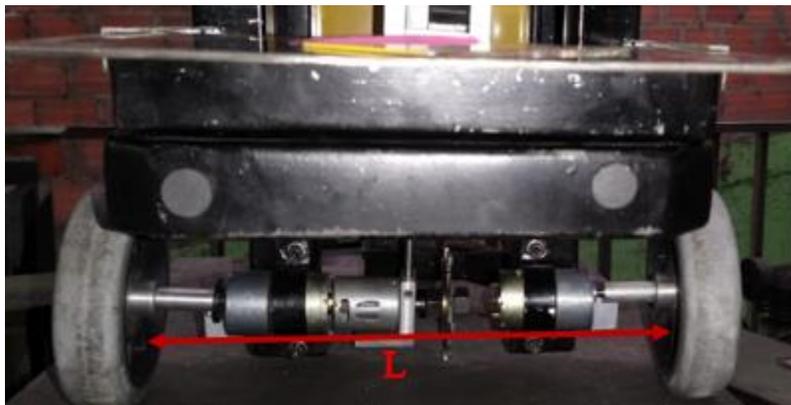
$$V_x = \frac{V_{Left} + V_{Right}}{2} * \cos(\theta) \quad (6)$$

$$V_y = \frac{V_{Left} + V_{Right}}{2} * \sin(\theta) \quad (7)$$

Ahora bien, para determinar la velocidad angular del robot, es preciso tener en cuenta las velocidades de ambas llantas y así mismo el radio de giro de ellas, sin descartar la longitud de las dos llantas que se encuentran fijas y la expresión resulta así:

$$\omega = \frac{V_{Left} + V_{Right}}{L} \quad (8)$$

Figura 21 : Distancia entre las llantas traseras



Nota. En la imagen se observa la distancia entre las dos llantas que permitirán calcular la velocidad angular del vehículo. (Propia)

Describiendo el modelo matemático de una manera más completa donde la velocidad la se expresara con respecto a la posición, se modela el siguiente sistema en el espacio de los estados, obteniendo:

$$V_x = \dot{x}$$

$$V_y = \dot{y}$$

$$\omega = \dot{\theta}$$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{V_{Left} + V_{Right}}{2} * \cos(\theta) \\ \dot{y} &= \frac{V_{Left} + V_{Right}}{2} * \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \frac{V_{Left} - V_{Right}}{L}\end{aligned}\tag{9}$$

En seguida se describirán las velocidades para cada una de las llantas, se obtiene:

$$V_{Left} = V_{Total} - \frac{\omega * L}{2}\tag{10}$$

$$V_{Right} = V_{Total} + \frac{\omega * L}{2}\tag{11}$$

No obstante, para la implementación de todos los conceptos anteriores es necesario hablar de la odometría la cual permite determinar la posición del robot sembrador a través de encoders:

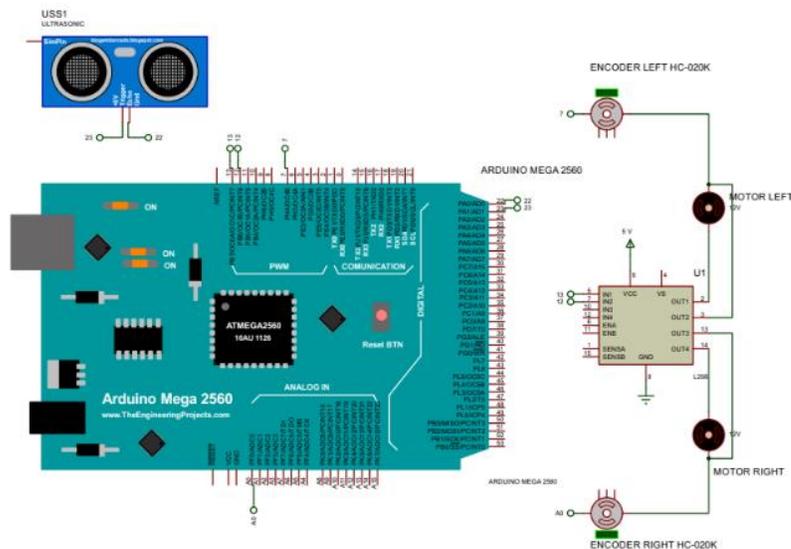
Figura 22: Encoder HC-020K



Nota. En la imagen se observa el Encoder HC -020K que será utilizada para medir la velocidad de cada una de las llantas para poder calcular la velocidad total del robot. (Libre, 2020)

Por lo tanto, el esquemático del sistema de navegación quedara de la siguiente manera:

Figura 23: Circuito electrónico para el control de trayectoria.



Nota. En la imagen se observa el circuito electrónico con el cual se controlará la velocidad de cada uno de los motores y la detección de obstáculos. (Propia)

5.1. Modelamiento del Sistema

Para comenzar a diseñar el controlador PID que se implementó en el robot sembrador de trigo, es necesario identificar cada una de las variables físicas de las que está compuesto el robot, tales como:

θ = Angulo del eje de referencia del robot con respecto a X

ω = Velocidad Angular del Robot

v = Velocidad Lineal del Robot

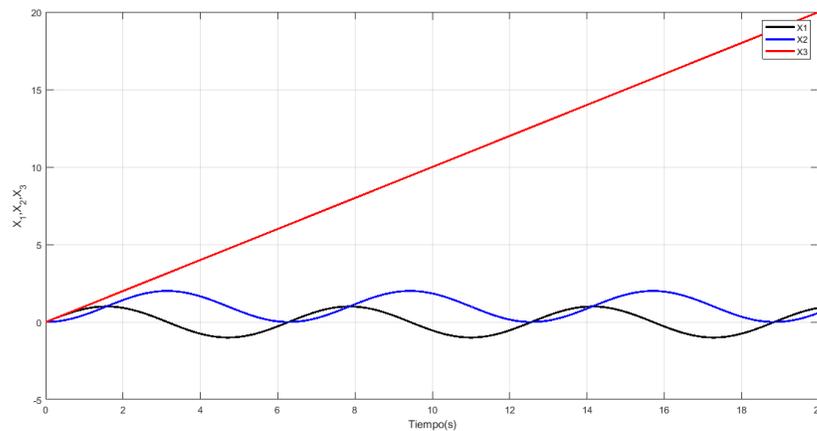
Ahora bien una vez definidas las variables del vehículo, es necesario plantear el modelo matemático, donde se obtiene:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \\ h = \theta \end{cases} \quad (12)$$

Expresando el modelo matemático en términos de x con el fin de evaluar y calcular el modelo de manera más simple, queda de la siguiente manera:

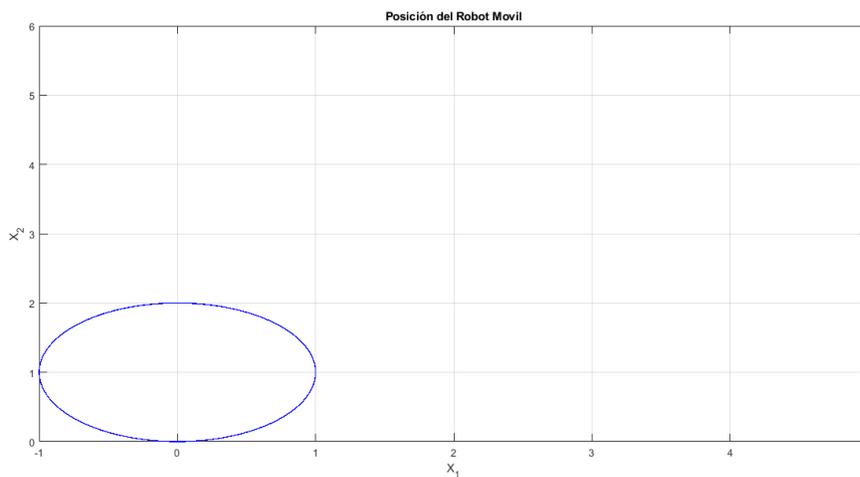
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v \cos x_3 \\ \dot{x}_2 = v \sin x_3 \\ \dot{x}_3 = \omega \\ h = \theta \end{cases} \quad (13)$$

Donde x_1 y x_2 son las coordenadas de rotación y x_3 representa la orientación del sistema, para validar la descripción del modelo se procede a realizar con las siguientes condiciones iniciales $IC = [0, 0, 0]$

Figura 24: Descripción de los estados del sistema

Nota. En la gráfica se observa el comportamiento de cada uno de los estados del sistema donde x_3 será la variable a controlar debido a que representa la orientación del robot. (Propia)

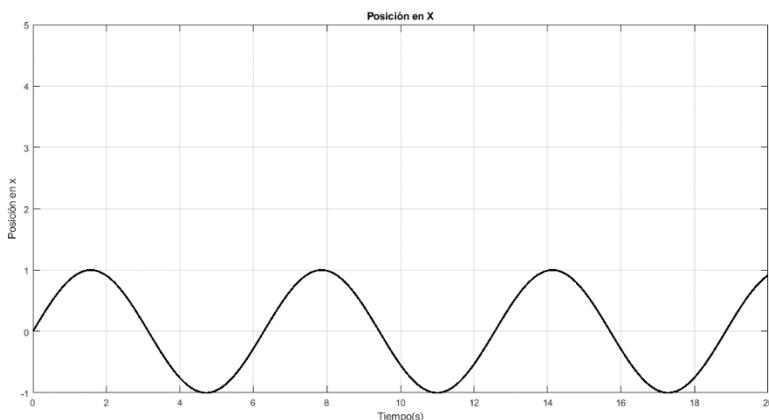
Ahora se graficará el centro de rotación del robot móvil con el fin de permitir más adelante diseñar el control teniendo en cuenta dichas especificaciones

Figura 25: Posición Inicial del Robot Móvil

Nota. En la gráfica se muestra la posición inicial del robot móvil y más específicamente el centro de rotación en el punto (0, 1). (Propia).

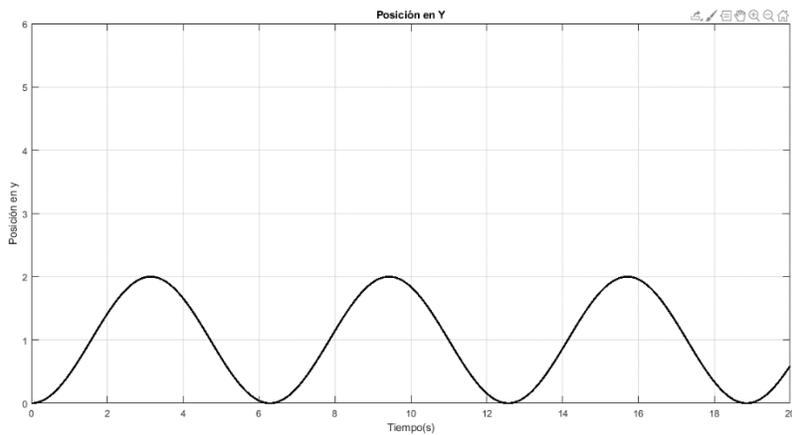
En las siguientes figuras se pueden apreciar las coordenadas de rotación con respecto al eje X y Y.

Figura 26: Posición del Robot Móvil en X



Nota. En la gráfica se observa el comportamiento de la posición del robot móvil en el eje X con respecto al tiempo. (Propia)

Figura 27: Posición del Robot Móvil en Y



Nota. En la gráfica se observa el comportamiento de la posición del robot móvil en el eje Y con respecto al tiempo. (Propia)

5.2. Control PID

Una vez se ha obtenido el modelamiento de la planta, se implementa el control proporcional tal como se describe en la siguiente ecuación que estará determinada en función de la orientación del robot ω , con el objetivo de alcanzar la posición deseada en el plano (X, Y).

$$u(t) = K_p e(t) \quad (14)$$

Donde $e = \varphi_d - \varphi$

Sin embargo, es necesario restringir la dinámica del error de alguna forma debido a que se están considerando ángulos, por lo cual se limitara entre $[-\pi, \pi]$ de modo que se obtenga:

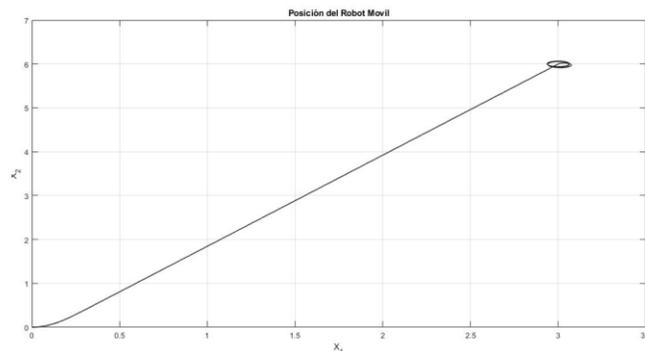
$$\varphi_d = \tan^{-1}\left(\frac{y_d - y}{x_d - x}\right) \quad (15)$$

$$\hat{e} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(e)}{\cos(e)}\right) \in [-\pi, \pi] \quad (16)$$

$$u = K_p \left[\tan^{-1}\left(\frac{\sin(\varphi_d - \varphi)}{\cos(\varphi_d - \varphi)}\right) \right] \quad (17)$$

Se selecciona como punto deseado o de referencia las coordenadas (3, 6) y se obtiene el siguiente resultado:

Figura 28: Posición del Robot Móvil con el controlador PID



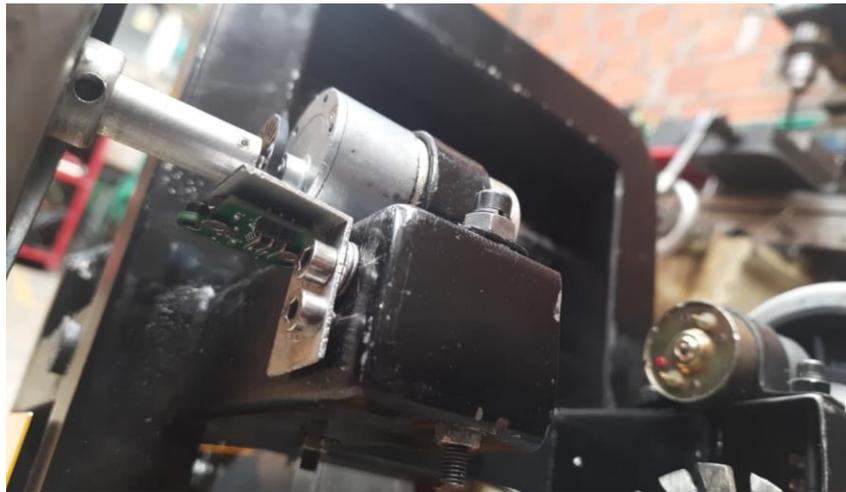
Nota. En la gráfica se observa como al controlar la orientación del robot se puede llegar a un punto deseado. (Propia)

Figura 29: Motores eléctricos implementados en el robot



Nota. En la imagen se observa la distribución de los motores para el mecanismo de siembra y el disco de perforación. (Propia)

Figura 30: Implementación de Encoder en el robot



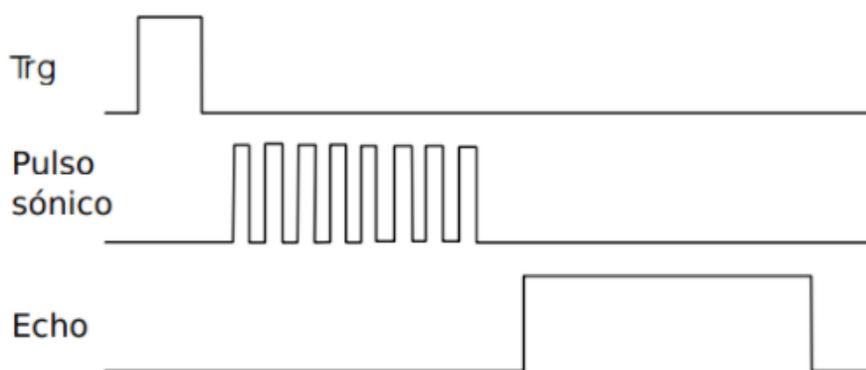
Nota. En la imagen se observa la implementación en una de las ruedas para poder medir la velocidad del robot sembrador de trigo para poder controlar la trayectoria. (Propia)

Adicionalmente al sistema de control se implementó un sensor ultrasónico que cumple la función de detectar obstáculos durante el recorrido de la trayectoria para que el robot sea capaz de reaccionar de manera anticipada contra cualquier tipo de choque, este sensor trabaja con ondas sonoras de 40 kHz imperceptibles considerando que el ser humano tiene un rango de audición de hasta 20 kHz, después de este rango se llaman sonidos ultrasónicos.

Este sensor está compuesto por elementos piezoeléctricos que son dos transductores que operan como receptor y emisor, su propio sistema de control, un ángulo de medición de 15° y una distancia que va desde 2 cm hasta 400 cm con una resolución de 3 mm.

El funcionamiento del sensor está basado en dos transductores piezoeléctricos, un emisor y un receptor, los cuales, por medio de una orden dada por el Trigger del sensor, envía una onda sonora que le permite medir la distancia ante cualquier tipo de objeto a través de 8 pulsos en una frecuencia de 40 kHz tal y como se muestra en la figura 30

Figura 31. Pulsos del sensor ultrasónico



Nota. En la imagen se explica el funcionamiento de los pulsos que envía el sensor para medir la distancia del objeto.(Cytron Technologies, n.d.)

Al momento de la implementación se escribió un código de programación en Arduino IDE, que se puede ver a continuación en la figura 31:

Figura 32. Programa del ultrasónico

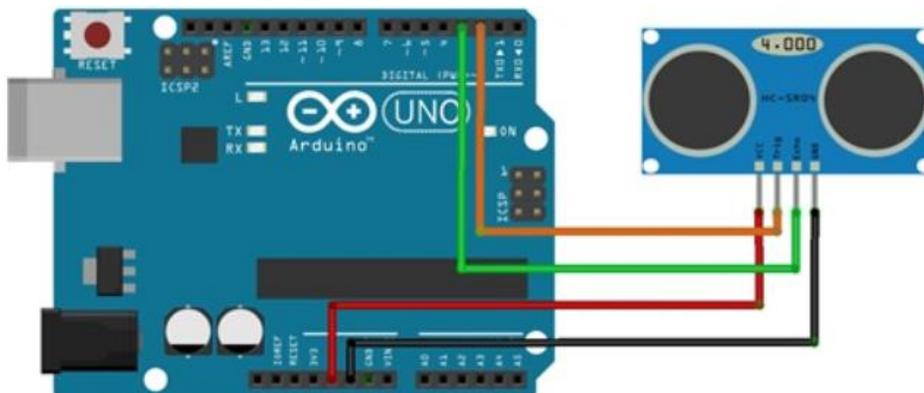
```

1  const int Trigger = 2; //Pin digital 2 para el Trigger del sensor
2  const int Echo = 3; //Pin digital 3 para el Echo del sensor
3
4  void setup() {
5  Serial.begin(9600); //inicializamos la comunicación
6  pinMode(Trigger, OUTPUT); //pin como salida
7  pinMode(Echo, INPUT); //pin como entrada
8  digitalWrite(Trigger, LOW); //Inicializamos el pin con 0
9  }
10
11 void loop() {
12 long t; //timepo que demora en llegar el eco
13 long d; //distancia en centimetros
14
15 digitalWrite(Trigger, HIGH);
16 delayMicroseconds(10); //Enviamos un pulso de 10us
17 digitalWrite(Trigger, LOW);
18
19 t = pulseIn(Echo, HIGH); //obtenemos el ancho del pulso
20 d = t/59; //escalamos el tiempo a una distancia en cm
21
22 Serial.print("Distancia: ");
23 Serial.print(d); //Enviamos serialmente el valor de la distancia
24 Serial.print("cm");
25 Serial.println();
26 delay(100); //Hacemos una pausa de 100ms

```

Nota. Programa que describe el funcionamiento del sensor ultrasónico. (Propia)

Figura 33. Esquema sensor ultrasónico



Nota. Se observan las conexiones y los pines que se utilizaron para implementar el sensor ultrasónico. (Mechatronics, n.d.)

Se prueba y se acondiciona el sistema para realizar la programación en el microcontrolador, obteniendo medidas cada segundo.

Figura 34. Medidas tomadas por el sensor

```
Distancia: 21cm  
Distancia: 0cm  
Distancia: 0cm  
Distancia: 35cm  
Distancia: 86cm  
Distancia: 93cm  
Distancia: 95cm  
Distancia: 95cm  
Distancia: 96cm  
Distancia: 95cm  
Distancia: 96cm
```

28

Nota. Se evidencia que el sensor toma una medida actualizándose y dando la distancia del objeto en tiempo real. (Propia)

Una vez se han integrado todos los elementos electrónicos dentro del robot se procede a realizar pruebas de funcionamiento con una fuente de voltaje de 12 V.

Figura 35: Pruebas de robot sembrador de Trigo



Nota. En la imagen se muestra la implementación del circuito electrónico con el control PID, en la donde se realizan pruebas con una fuente regulada de 12 V. (Propia)

6. Conclusiones

A lo largo del proyecto se presentaron diferentes limitaciones al momento de implementar el controlador para el seguimiento de trayectoria del robot, debido a que se tuvieron que considerar aspectos tales como la estabilización del robot durante su desplazamiento para que mantuviera siempre un punto de equilibrio con respecto a la trayectoria de referencia. Por otro lado, al momento de la lectura de los encoders es importante considerar que se genera una señal de ruido, la cual debe ser filtrada con el objetivo de tener una mejor lectura de los datos para evitar que se presenten fallos durante la ejecución de la tarea.

Durante la construcción del robot se debieron considerar ciertas características que permitieran mover de manera libre el robot para la elección de los dispositivos y así mismo materiales que se adaptaran a cualquier tipo de entorno, es por ello que fue necesario elegir motores con un buen torque y que a su vez fueran fáciles de alimentar, materiales que permitieran formar la mejor estructura del robot y otros elementos como sensores que tengan la mejor precisión para poder controlar la trayectoria del robot.

Es importante considerar que antes de la construcción fue necesario diseñar a través del software de dibujo asistido como *SolidWorks* que permitiera calcular la resistencia de los materiales a utilizar y así mismo que brindara la posibilidad de ensamblar las diferentes partes de las que estuvo compuesto el robot.

Existen diversos tipos de controladores que pueden solucionar el problema del seguimiento de trayectoria, pero esto va a depender del tipo de aplicación en la cual se desea implementar, para este caso se utiliza un control proporcional intentando buscar una buena eficiencia del sistema con

respecto a la distancia recorrida, orientación del robot, tiempo de ejecución y movimientos suaves con el fin de evitar daños en el motor o comportamientos indeseables.

Finalmente, para lograr toda la integración, tanto de la parte mecánica como la electrónica fue importante tener en cuenta aspectos previamente estudiados que facilitaran el uso y la implementación de los mecanismos y los componentes electrónicos, debido que al momento de ejecutar las actividades es mucho más sencillo acoplar cada uno de los elementos.

7. Referencias Bibliograficas

- [1] A.Pozo-Ruz*, A.Ribeiro, M.C.García-Alegre, & L.García, D.Guinea, F. S. (2016). SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS): DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS DE ERRORES, APLICACIONES Y FUTURO. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas 28500 Arganda. Madrid*, 9.
- [2] Barrientos Sotelo, V. R., & García Sánchez, José Rafael; Silva Ortigoza, R. (2007). Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. *Instituto Politécnico Nacional Distrito Federal, México*, 7.
- [3] Camilo Bernal, J. (2015). *CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT SEMBRADOR DE MAÍZ AGROBOT II UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES ALTERNATIVA TRABAJO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA BOGOTÁ*. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/3205/4/ROBOT_AGROBOT_CX.pdf
- [4] Cytron Technologies. (n.d.). *Sensor ultrasónico de distancia ó proximidad. Rango de 2 cms hasta 4 metros. Modelo HC-SR04*. https://www.puntoflotante.net/HC-SR04Users_Manual.pdf
- [5] Fendt. (2021). La última generación de robots de siembra: El Fendt Xaver se hace adulto. *AGCO Your Agriculture Company*. https://msc.fendt.com/modules/create_pdf/pdf2/17203_web_es-ES_2021-12-20_09-14-51.pdf
- [6] INCyTU. (2018). Agricultura de Precisión. *FCCyT*, 6.
- [7] Libre, M. (2020). *Kit Encoder Medidor De Velocidad Optico Hc-020k Arduino*.
- [8] Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. 12. <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [9] Mechatronics, N. (n.d.). *TUTORIAL DE ARDUINO Y SENSOR ULTRASÓNICO HC-SR04*. 2010. https://naylampmechatronics.com/blog/10_tutorial-de-arduino-y-sensor-ultrasonico-hc-sr04.html
- [10] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2016). Estrategia Colombia Siembra. *Madr*, 1, 55. http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Archivos/Foros/caracterizacion_citricos1.pdf
- [11] Quintero Rodriguez, Lorena; Lopez González, N. (2020). Realidad del subsector de trigo en Colombia después de la firma de los TLC con Canadá y Estados Unidos. *Universitaria Agustiniiana*, 21(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101607><https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2020.02.034><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cjag.12228><https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104773><https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.04.011><https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.04.011>
- [12] Reyes, F. (2011). *ROBOTICA. Control de Robots Manipuladores* (Alfaomega Grupo Editor (ed.); 1st ed.).
- [13] Washington, B. M. (2007). Agricultura para el desarrollo Panorama general. In *Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial*. www.worldbank.org

[14] World Eben, E. (2021). *Robots Móviles*.