



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Colima

Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

PRESENTA

ING. VÍCTOR URIEL FARÍAS MORENO

DIRECTOR DE TESIS

D. EN C. NICANDRO FARÍAS MENDOZA

CO-DIRECTOR DE TESIS

DR. NOEL GARCÍA DÍAZ

VILLA DE ÁLVAREZ, COL. AGOSTO DE 2019





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Colima

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Villa de Álvarez, Colima, **Julio/2019**

OFICIO No. DEPI-

**C. ING. VÍCTOR URIEL FARÍAS MORENO
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES
PRESENTE**

La División de Estudios de Posgrado e Investigación de acuerdo al procedimiento para la obtención del Título de Maestría de los Institutos Tecnológicos y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la comisión revisora hizo a su trabajo profesional denominado **"Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales"**, por la opción de tesis, que para obtener el grado de Maestro en Sistemas Computacionales será presentado por Usted, tiene a bien concederle la **AUTORIZACIÓN** de impresión de la tesis citada.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial y afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

RAMONA EVELIA CHÁVEZ VALDEZ
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COLIMA
División de Estudios de Posgrado e Investigación

C.p. Archivo.



Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Colima, por seleccionarme para formar parte de la generación 2017 en este programa.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por proporcionarme el apoyo económico necesario para dedicar todo mi tiempo al estudio.

A los maestros y revisores por guiarme a lo largo del programa, proporcionando los conocimientos de las materias dentro del programa y compartiendo experiencias indispensables para cumplir los requerimientos del programa de la manera más organizada y sin preocupaciones a lo desconocido. Particularmente quisiera agradecer al Dr. Nicandro Farías y al Dr. Noel García cuyo apoyo fue vital para la elaboración de este trabajo de tesis.

A los compañeros de esta y otras generaciones que proporcionaron su apoyo y cooperación que tuvo un gran impacto en reducir la carga de trabajo durante los cursos del programa.

Finalmente quisiera agradecer a toda mi familia, padres y hermanos que ofrecieron su apoyo incondicional durante todo el programa.

Resumen

La agricultura de precisión es una tecnología que viene desarrollándose desde los años 80 cuya implementación provee beneficios considerables, permitiendo la utilización efectiva de los productos agroquímicos que favorece la productividad y una reducción en costos de producción, incrementando el margen de ganancias de los productores agrícolas, reduciendo los daños en la salud relacionados con la aplicación de agroquímicos. Este trabajo de tesis presenta un modelo de vehículo terrestre no tripulado controlado remotamente a través de un sistema WEB desarrollado para administrar el envío de comandos de movimiento, control de actuadores y lectura de sensores con el propósito de aplicar agroquímicos de manera segura en plantas de ornato por aspersión, proporcionando al productor una alternativa que reduce la exposición a productos químicos nocivos al momento de aplicar agroquímicos en plantas de ornato. En la construcción del vehículo se utilizan un enfoque de diseño mecánico y estructural para el chasis del vehículo autónomo, MOSFET para el diseño eléctrico y electrónico para controlar los actuadores incorporados al vehículo, un dispositivo Raspberry para implementar la interfaz WEB aplicando tecnologías de comunicación wi-fi para la administración y control completo de los motores de tracción. Obteniendo una plataforma vehicular de bajo costo y fácil reproducción utilizando materiales disponibles localmente que lo hace más asequible para su adquisición e implementación a comparación de otros desarrollos similares.

Palabras clave: UGV, Agricultura de precisión, BLDC, Sistemas WEB, SBC

Abstract

Precision agriculture is a still evolving technology dating back from the 80's whose implementation provides substantial benefits, allowing the efficient use of agrochemical products which enhances productivity, therefore increasing the profit margin of the agricultural products and reducing the health risks related to the application of these agrochemicals. This thesis paper presents a model for an unmanned ground vehicle controlled remotely via a WEB system created to administrate sent commands for movement and controlling the actuators and reading sensors in the vehicle with the purpose of safely applying agrochemicals to ornamental plants by means of sprinkling, offering the producer an alternative way of applying agrochemicals that reduces dramatically the risk of human exposure to harmful chemical elements. The construction of the vehicle focuses in the aspect of mechanical and structural design for the autonomous vehicle's chassis, MOSFET Devices were used in the electrical and electronic design for controlling the actuators incorporated in it, a Raspberry device was used for implementing the WEB interface using wi-fi technologies for managing and controlling traction motors. Obtaining a low cost vehicular platform that is simple to produce with locally sourced materials which makes its acquisition and implementation more viable compared with other similar developments.

Keywords: UGV, Precision agriculture, BLDC, WEB Systems, SBC

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. La naturaleza del problema | 1 |
| 1.2. Contexto del problema | 5 |
| 1.3. Revisión de la literatura (Soporte de la investigación) | 9 |
| 1.4. Propuesta de la solución al problema | 11 |
| 1.5. Justificación | 14 |
| 1.6. Motivación | 15 |
| 1.7. Hipótesis | 15 |
| 1.8. Objetivos..... | 15 |
| 1.8.1. Objetivo general | 15 |
| 1.8.2. Objetivos específicos..... | 16 |
| 1.9. Descripción y organización del trabajo..... | 16 |
| 2. Estado del campo de conocimiento | 18 |
| 2.1. Marco histórico | 18 |
| 2.1.1. La agricultura en la antigüedad | 18 |
| 2.1.2. La mecanización agrícola..... | 18 |
| 2.1.3. Los agroquímicos | 19 |
| 2.1.4. La agricultura de precisión | 21 |
| 2.2. Marco contextual | 22 |
| 2.2.1. Sistema de sensores integrados para el monitoreo de las condiciones de crecimiento en el arroz basado en un Sistema de vehículo terrestre no tripulado. | 23 |
| 2.2.2. Sistema robótico para cosecha de arrozales en Japón | 24 |
| 2.2.3. Sistema de guía para maquinaria agrícola basada en GPS y GIS | 28 |
| 2.3. Marco teórico..... | 30 |
| 2.3.1. Agricultura de precisión | 30 |
| 2.3.2. Sistemas no tripulados | 30 |
| 2.3.3. Vehículo aéreo no tripulado | 30 |
| 2.3.4. Sistemas autónomos..... | 31 |
| 2.3.5. Algoritmo | 31 |
| 2.3.6. Lenguaje de programación..... | 31 |
| 2.3.7. Lenguaje de programación..... | 32 |
| 2.3.8. Pseudocódigo | 32 |
| 2.3.1. Electrónica de potencia | 33 |
| 2.3.2. Conmutación | 35 |

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.3. | Rectificador de diodos | 35 |
| 2.3.4. | Convertidores CD-CD..... | 35 |
| 2.3.5. | Transistores de potencia | 36 |
| 2.3.6. | Puente H..... | 38 |
| 2.3.7. | Motor de CD | 39 |
| 2.3.8. | Motor BLDC..... | 39 |
| 2.3.9. | Microcontrolador..... | 40 |
| 2.3.10. | Diseño..... | 40 |
| 2.3.1. | Dimensiones y tolerancias | 41 |
| 2.3.2. | Normas | 42 |
| 2.3.1. | Resistencia mecánica..... | 42 |
| 2.3.1. | Esfuerzo mecánico | 42 |
| 2.3.1. | Deformación | 43 |
| 2.3.1. | Rigidez..... | 43 |
| 2.3.2. | Dureza | 43 |
| 2.3.1. | Cargas mecánicas..... | 43 |
| 2.3.1. | Efecto de la temperatura en piezas mecánicas | 44 |
| 2.3.1. | Aluminio..... | 44 |
| 2.3.1. | Sistema de suspensión vehicular..... | 44 |
| 2.3.2. | Resorte | 45 |
| 2.3.3. | PIC18F26K40 | 47 |
| 2.3.1. | Raspberry Pi 3 Modelo B+ | 48 |
| 2.3.2. | Raspbian | 48 |
| 3. | Metodología empleada | 49 |
| 3.1. | Tipo de investigación..... | 49 |
| 3.2. | Investigación documental preliminar | 49 |
| 3.3. | Descripción de la metodología | 49 |
| 3.3.1. | Cronograma de actividades | 50 |
| 3.3.2. | Descripción de los procedimientos..... | 51 |
| 4. | Desarrollo | 53 |
| 4.1. | Análisis de requerimientos | 53 |
| 4.2. | Descripción del sistema a desarrollar | 53 |
| 4.3. | Diseño mecánico y estructural | 54 |
| 4.3.1. | Dimensiones exteriores..... | 54 |
| 4.3.2. | Diseño del chasis | 54 |

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 4.3.3. | Sistema de suspensión | 55 |
| 4.3.4. | Ensamblaje de masa – rueda..... | 59 |
| 4.3.5. | Ensamblaje motor – reductor | 64 |
| 4.4. | Diseño eléctrico y electrónico..... | 72 |
| 4.4.1. | Descripción general..... | 72 |
| 4.4.2. | Diseño del controlador de motores BLDC..... | 73 |
| 4.4.3. | Análisis electromecánico del motor BLDC8318 | 77 |
| 5. | Implementación | 79 |
| 5.1. | Chasis..... | 79 |
| 5.2. | Sistema de suspensión | 80 |
| 5.3. | Ensamblaje masa-rueda | 80 |
| 5.4. | Ensamblaje motor – reductor | 81 |
| 5.5. | Controlador para motor BLDC 8318..... | 82 |
| 5.6. | Tren motriz | 82 |
| 5.7. | Interfaz de control AgR Controller | 83 |
| 6. | Pruebas | 84 |
| 6.1. | Tiempo de arranque | 84 |
| 6.2. | Comunicación con la interfaz WEB..... | 85 |
| 6.3. | Alcance de conexión | 86 |
| 7. | Resultados | 87 |
| 7.1. | Tiempo de arranque | 87 |
| 7.2. | Prueba de conexión..... | 87 |
| 7.3. | Transmisión de comandos | 88 |
| 7.4. | Alcance de comunicaciones..... | 88 |
| 7.5. | Discusión de resultados | 89 |
| 8. | Conclusiones | 90 |
| 8.1. | Discusión | 90 |
| 8.2. | Cumplimiento de los objetivos de la investigación..... | 90 |
| 8.3. | Las limitaciones de la investigación | 90 |
| 8.4. | Recomendaciones para continuar la investigación en lo futuro..... | 91 |
| Bibliografía | | 92 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Prototipo KERVEROS, un UGV empleado en la vigilancia de terrenos | 4 |
| Figura 2: Distribución de productores de plantas ornamentales en el estado de Colima, México. ... | 6 |
| Figura 3: Eslabones del Comité Sistema Producto Plantas Ornamentales..... | 7 |
| Figura 4: Elementos de protección necesarios para la aplicación de agroquímicos. | 8 |
| Figura 5: Prototipo de robot móvil agrícola. | 10 |
| Figura 6: Prototipo de robot agrícola multifuncional de bajo costo. | 11 |
| Figura 7: Esquema del modelo propuesto. | 12 |
| Figura 8: Plataforma UGV equipada con sensores, trabajando en los campos de arroz..... | 23 |
| Figura 9: Diseño de la plataforma UGV | 24 |
| Figura 10: Tractor robótico | 25 |
| Figura 11: Robot trasplantador..... | 26 |
| Figura 12: Robot cosechador | 26 |
| Figura 13: Diagrama de bloques de las plataformas robóticas..... | 27 |
| Figura 14: Comparación de tiempo requerido para el traslado de los UGV entre campos | 28 |
| Figura 15: Estructura de hardware para el sistema de guía asistida..... | 29 |
| Figura 16: Barra de LED de guía | 29 |
| Figura 17: Procedimiento para solucionar un problema de programación. | 32 |
| Figura 18: Pseudocódigo. | 33 |
| Figura 19: Relación de la electrónica de potencia con la energía, la electrónica y el control. | 34 |
| Figura 20: Circuito rectificador monofásico..... | 35 |
| Figura 21: Conversor CD-CD | 36 |
| Figura 22: Clasificación de BJT..... | 37 |
| Figura 23: Clasificación de MOSFET..... | 38 |
| Figura 24: Diagrama eléctrico de medio puente H..... | 39 |
| Figura 25: Proceso de diseño. | 41 |
| Figura 26: Resorte helicoidal de coeficiente constante y resortes de coeficiente variable..... | 45 |
| Figura 27: Principio de funcionamiento de la suspensión por barras de torsión. | 46 |
| Figura 28: Muelle..... | 47 |
| Figura 29: PIC18F26K40..... | 47 |
| Figura 30: Raspberry Pi 3 Modelo B+..... | 48 |
| Figura 31: Chasis diseñado para el EGV agrícola..... | 55 |
| Figura 32: Soportes móviles y fijos para la barra de torsión..... | 56 |
| Figura 33: Ensamblaje masa - rueda. | 60 |
| Figura 34: Rueda de 9 pulgadas utilizada en el UGV agrícola. | 60 |
| Figura 35: Estator, componente en el ensamblaje masa - rueda. | 61 |
| Figura 36: Parte frontal y trasera del rotor. | 62 |
| Figura 37: Flecha del ensamblaje masa – rueda. | 62 |
| Figura 38: Acoplamiento para la junta universal. | 63 |
| Figura 39: Exterior del ensamblaje motor-reductor..... | 64 |
| Figura 40: Porta-Planetas del ensamblaje motor-reductor. | 65 |
| Figura 41: Resistencia $R_{DS(on)}$ contra temperatura de la unión T_j para el MOSFET IRF1404..... | 76 |
| Figura 42: Chasis ensamblado del UGV agrícola..... | 79 |
| Figura 43: Soportes para el sistema de suspensión del UGV agrícola. | 80 |
| Figura 44: Ensamblaje masa-rueda del UGV agrícola. | 81 |
| Figura 45: Ensamblaje motor-reductor del UGV agrícola..... | 81 |
| Figura 46: Estructura de montaje para el controlador de motores BLDC..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 47: Ensamblaje de tren motriz. | 83 |
| Figura 48: Componentes del tren motriz montados en el chasis del UGV agrícola. | 83 |
| Figura 49: Interfaz de control AgR Controller..... | 84 |
| Figura 50: Raspberry pi 3 Modelo B usado como módulo de cómputo en el UGV agrícola. | 85 |
| Figura 51: Sección de control manual en la interfaz AgR Controller. | 86 |
| Figura 52: Mensaje indicador de conexión exitosa. | 87 |
| Figura 53: Comandos disponibles para los motores BLDC 8318 en la interfaz AgR Controller. | 88 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Cronograma de actividades..... | 50 |
| Tabla 2: Tabla de actividades para el proyecto de tesis. | 51 |
| Tabla 3: Requerimientos del productor para el UGV agrícola..... | 53 |
| Tabla 4: Dimensiones exteriores para el UGV agrícola. | 54 |
| Tabla 5: Valores de a y b para una sección transversal rectangular. | 57 |
| Tabla 6: Parámetros para el cálculo de deformación angular. | 57 |
| Tabla 7: Parámetros de los engranes en el ensamblaje motor-reductor. | 66 |
| Tabla 8: Valores del factor de forma de Lewis. | 68 |
| Tabla 9: Resistencias mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros | 72 |
| Tabla 10: Características eléctricas del motor BLDC 8318..... | 73 |
| Tabla 11: Características eléctricas del MOSFET IRF1404..... | 74 |
| Tabla 12: Resultados de las pruebas de tiempo de arranque..... | 87 |
| Tabla 13: Resultado de prueba de comunicaciones. | 89 |

1. Introducción

1.1. La naturaleza del problema

La agricultura es una actividad que ha estado presente desde los inicios de la civilización. “El inicio de las actividades dedicadas a la agricultura y ganadería en la humanidad data de aproximadamente hace más de 12.000 años” (Ramírez Morales, Ruilova Reyes, & Garzón Montealegre, 2015) Su importancia era y sigue siendo vital para la obtención de plantas.

Con base al plan rector publicado por COEPPLANTS (2012), a grandes rasgos, podemos dividir las plantas útiles al hombre en ocho grupos principales, de acuerdo con su importancia para diferentes ramas de la actividad humana. Estos grupos son:

- Plantas alimenticias básicas.
- Plantas para la industria alimentaria.
- Plantas alimenticias secundarias.
- Plantas forrajeras.
- Plantas que son o producen materias primas para la industria no alimentaria.
- Plantas de uso artesanal.
- Plantas de ornato y de valor urbanístico.
- Plantas medicinales y plantas de utilidad indirecta.

El punto de interés en esta tesis se centra en las plantas de ornato y de valor urbanístico. Estas plantas son aquellas que se cultivan con propósitos decorativos, y son ampliamente utilizadas en los hogares, así como en las calles de las ciudades. La variedad de plantas que pueden utilizarse es muy alta, prácticamente cualquier planta puede ser una planta de ornato, el único requisito es el de poder sobrevivir en las condiciones del área y ser atractiva hacia la población del área. En (COEPPLANTS, 2012) se menciona que las plantas de ornato pertenecen a un sector agrícola muy versátil; el cual abarca ocho líneas de producción, entre las que destacan:

- Plantas de flor
- Plantas para landscaping
- Césped, palmas
- Pascuas
- Árboles
- Orquídeas

- Flores de corte.

Con el paso de los años, el cultivo de plantas de ornato ha pasado a ser una actividad agropecuaria de escala industrial. Según (Ramírez Morales, et. al 2015), las plantas de ornato se caracterizan por un amplio aprovechamiento de los recursos naturales como suelo y agua, así como por una intensa actividad de trabajo por unidad de área, esto a su vez implica mayores costos de inversión por unidad de área de tierra y mayor necesidad de gestionar la complejidad productiva

Como toda actividad económica, el cultivo de plantas de ornato tiene el objetivo final de generar capital para los contribuyentes, por ello es que es importante mantener el proceso de producción en condiciones tales que permitan:

- Máxima calidad del producto
- Mínimo tiempo de producción
- Mínimo costo de producción
- Minimizar la exposición de los trabajadores a los agroquímicos

*El ecosistema económico que vive actualmente la industria de ornamentales en México es competitivo, conteniendo con otras naciones en la comercialización de sus productos. Sin embargo, las empresas extranjeras cuentan con un proceso de producción que les permite mantener una **competitividad** superior a las de los productores mexicanos.*

Este es uno de los tres factores propuestos por (Solleiro & del Carmen, 1993) que determinan el modo de incorporación de la tecnología a los procesos productivos, mostrados a continuación:

“A] La mayor influencia de los países industrializados en los de desarrollo tardío, que se favorece con el avance de las comunicaciones.

B] La estructura productiva que surge del proceso industrializador, en el que tienen especial importancia el capital extranjero y el Estado, determinante y ejecutor de políticas. En México, por ejemplo, la estructura productiva de la agricultura está muy polarizada.

C] El reducido vínculo del sector productivo con los centros de investigación y educación superior. Éstos tienen poca capacidad para captar las demandas reales de tecnología y los productores tienen poco interés en recurrir a dichos centros, pues la obtienen, "sin riesgos", al comprar equipo, semilla mejorada, fertilizantes, etcétera. Además, la formación de los agrónomos ha estado fuertemente influida por los avances científico-tecnológicos de Estados Unidos.”

Basándose en estos principios, los productores de plantas de ornato en el estado de Colima actualmente sufren de dos de estos criterios (A y B), por lo cual es urgente que sean atendidos para mantener la competitividad internacional.

Para ello existen diferentes tecnologías que se han implementado para mejorar el proceso de producción de las plantas ornamentales. Según (Ramírez Morales, Ruilova Reyes, & Garzón Montealegre, 2015), los 5 aspectos clave, o hitos en el desarrollo del sector agropecuario son:

- Intensificación
- Selección genética
- Optimización
- Automatización
- Transgénesis

El enfoque de esta tesis está en la automatización, la cual implica el uso de maquinaria para realizar tareas repetitivas sin que el operario intervenga, reduciendo el esfuerzo necesario y los riesgos implicados para realizar dicha tarea.

Existen muchas técnicas para automatizar el proceso de producción de plantas ornamentales. Una de las tecnologías que han surgido los últimos años son los Vehículos Aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés), los cuales tienen la capacidad de realizar tareas de forma autónoma. Empleando para esto tecnologías tales como transmisión de datos inalámbrica (Bluetooth, Wi-Fi, GSM radiofrecuencia de 433 MHz entre otros) y el uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés), han ganado popularidad debido a la reducción de su costo y el surgimiento de plataformas de hardware y software abiertas a todo el público.

Otro concepto de mucha importancia es el robot móvil o Vehículo Terrestre No Tripulado (UGV por sus siglas en inglés), el cual es un vehículo que opera en contacto con el suelo, cargando equipamiento o materiales, sin que lleve consigo presencia humana (Fofilos, Xanthopoulos, Romanos, Zikidis, & Kanellopoulos, 2014).

Dentro de aplicaciones militares, un UGV puede:

- Ofrecer una plataforma móvil excelente para cargar sensores, los cuales realizan tareas de vigilancia, detección e identificación de objetivos.
- Operar en un ambiente que puede ser riesgoso, o incluso letal para el personal realizando dicha tarea. (Fofilos, Xanthopoulos, Romanos, Zikidis, & Kanellopoulos, 2014)

Un ejemplo de la utilización de un UGV se encuentra en la Figura 1, en dónde se puede apreciar la utilización de estos para realizar tareas de vigilancia por medio de una cámara de video-vigilancia montada en el mismo.

El uso de plataformas robóticas controladas remotamente se puede aplicar en la producción de plantas ornamentales dónde es común el uso de agroquímicos potencialmente peligrosos para el usuario que debe de utilizar equipo protector para aplicarlo, e incluso con su uso el nivel de protección no es total, basándose en entrevistas realizadas con los productores, los efectos adversos son perceptibles incluso usando el equipo de protección.



Figura 1: Prototipo KERVEROS, un UGV empleado en la vigilancia de terrenos (Fofilos, Xanthopoulos, Romanos, Zikidis, & Kanellopoulos, 2014)

1.2. Contexto del problema

En México, la agricultura es una actividad económica de gran importancia. Una de las ramas que derivan de dicha actividad es la agricultura de plantas de ornato (plantas usadas para decoración), la cual alcanzó ventas de exportación con un valor de \$51, 603, 661 dólares americanos en el año 2001. “Según (COEPPLANTS, 2012), la Industria de Ornamentales es un sector agrícola de gran importancia económica para nuestro País. Hemos visto su desarrollo a pasos agigantados durante los últimos años.

Estamos hablando de una Industria que en los últimos años ha generado ventas que sobrepasan los cuarenta millones de dólares, aportando el 4.7 % al producto interno bruto del país. El desarrollo y crecimiento de este sector ha sido vertiginoso y palpable. Evidencia de esto, es el sinnúmero de proyectos urbanos, cuyos jardines forman parte integral del diseño de su estructura. (COEPPLANTS, 2012)

El estado de Colima cuenta con condiciones favorables para el cultivo de plantas de ornato, de las cuales las que cuentan con mayor volumen de producción son:

- Pata de elefante
- Palmas
- Crotos
- Rosa del desierto
- Ficus
- Shefleras
- Palo de Brasil
- Mandevillas

ORNACOL es una de las principales asociaciones de productores de plantas ornamentales en el estado de Colima. A continuación se da una breve descripción de la organización:

Ornamentales de Colima SPR de RL de CV fue creado en el 2009 por cuarenta viveristas locales con el objetivo de comercializar especies ornamentales producidas en el estado de Colima. Nace por la necesidad de dar al cliente una solución integral a sus necesidades ofreciendo una planta de acopio y comercialización de plantas de ornato, así mismo ayudar a los productores a eficientar sus costos de producción obteniendo un mejor precio en la compra de insumos. Actualmente cuenta con alrededor de 57viveristas socios distribuidos en todo el estado (Vargas Gonzalez, 2017)

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

La función principal de Ornamentales de Colima S.P.R. de R.L. de C.V. es el de comercializar especies ornamentales producidas en el estado de Colima, para lo cual se desarrolló una estrategia que genere productos y servicios de alto valor agregado, ayude a incrementar la productividad y reducir costos, así como disminuir los riesgos comerciales de sus actividades. Su objetivo es innovar los procesos actuales de la comercialización, incrementando progresivamente la producción, la calidad de los productos, la creación de empleos directos e indirectos, la rentabilidad de las empresas y la calidad de vida de todos los participantes en la cadena de valor, y por consiguiente eliminar las restricciones tecnológicas que enfrentan los viveristas en el estado para proveer soluciones integrales de producción y comercialización generando valor a todos los participantes de la cadena (Vargas Gonzalez, 2017)

La distribución de productores de plantas ornamentales en el estado de Colima puede apreciarse en la Figura 2.

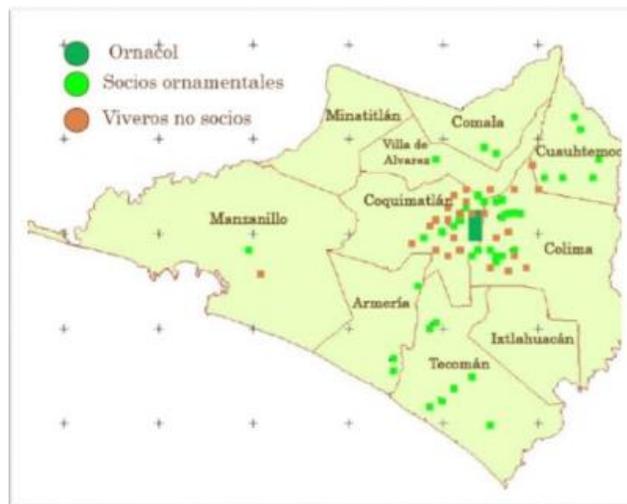


Figura 2: Distribución de productores de plantas ornamentales en el estado de Colima, México. (Vargas Gonzalez, 2017)

En su plan rector de 2012, COEPPLANTS describe su misión y visión como:

MISIÓN

“FORTALECER NUESTROS ESFUERZOS A TRAVEZ DE LA MEJORA CONTINUA PARA DAR UN PRODUCTO DE CALIDAD A NUESTROS CLIENTES, PARTICIPANDO EN EL EQUILIBRIO ECOLOGICO”

VISIÓN

“SER UNA ORGANIZACIÓN FORTALECIDA POR EL CONJUNTO DE ESFUERZOS QUE GENEREN PRODUCTOS DE CALIDAD CON ESTÁNDARES INTERNACIONALES EN UN ORDEN IDEOLÓGICO DE GLOBALIZACIÓN” (COEPPLANTS, 2012)

A diferencia de las actividades agrícolas de producción de plantas alimenticias, la producción de plantas ornamentales no cuenta con las extensiones de tierra para la cosecha de sus productos, contando con 332 hectáreas en todo el estado de Colima, empleando sólo el 58% de esta. Sin embargo, y a pesar de la situación financiera actual, el sector genera más de 500 empleos permanentes directos, y aproximadamente 120 empleos temporales anuales (COEPPLANTS, 2012)

Además, es importante notar que la producción de plantas ornamentales es sólo uno de los pasos de todo el proceso para la generación de ganancias, a grandes rasgos, los eslabones que componen el proceso están integrados en el Comité Sistema Producto Plantas Ornamentales, ilustrados en el diagrama de la Figura 3.

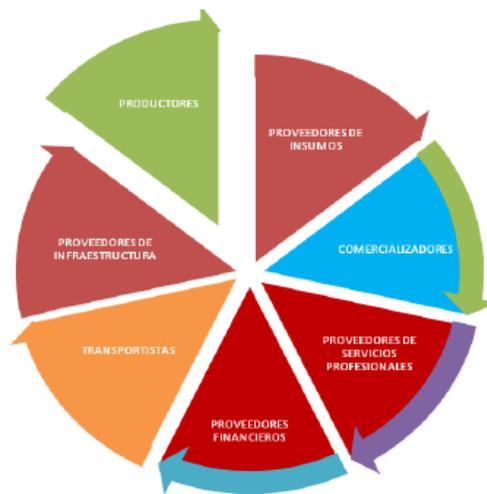


Figura 3: Eslabones del Comité Sistema Producto Plantas Ornamentales. (COEPPLANTS, 2012)

Es importante notar que los productores son sólo uno de 7 eslabones involucrados en la producción y comercialización de plantas ornamentales, por lo que las ganancias potenciales se ven reducidas con la cantidad de pasos que el producto tiene que dar para llegar al productor final.

Debido a los pequeños márgenes de utilidad que obtienen la gran mayoría de los productores, son pocos quienes tienen la oportunidad de mecanizar e incrementar la eficiencia de sus procesos. Los principales componentes de este rubro son:

- Aspersores manuales y de motor
- Herramienta menor (tijeras para podar, carretillas, palas, manguera, regaderas, etc.)
- Motobombas
- Plástico y PVC para reparación o construcción de túneles de enraizado
- Remolques
- Malla sombra, perfiles metálicos y cable
- Camionetas, camiones de 3 y 5 ton
- Sistemas de riego
- Mezcladoras de sustrato. (COEPPLANTS, 2012)

Según lo visto en el Plan Rector de COEPPLANTS, los productores de plantas ornamentales cuentan con un nivel de mecanización muy bajo, lo cual además de disminuir la rentabilidad del proceso de producción, además incrementa los riesgos potenciales de los trabajadores, ya que estos se encuentran en condiciones de trabajo que en ocasiones los exponen a peligros tales como los agroquímicos tóxicos para los humanos, los cuales son indispensables para el control de plagas. A pesar de la gran cantidad de agroquímicos que se emplean constantemente, es poco lo que se conoce sobre su toxicidad en los organismos, incluyendo al ser humano, así como el impacto ambiental global (García Gutiérrez & Rodríguez Meza, 2012).



Figura 4: Elementos de protección necesarios para la aplicación de agroquímicos. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012)

Es difícil utilizar productos agroquímicos de tal forma que no representen un peligro para el usuario, las plantas a las que se les aplica, el medio ambiente y las personas cercanas al área de aplicación. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) en su publicación “Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para el Productor Hortofrutícola”, las medidas de seguridad que se deben aplicar a la hora de aplicar agroquímicos es las siguientes:

- Antes de la aplicación se debe verificar el buen funcionamiento de los equipos; que las boquillas o picos pulverizadores tengan una distribución uniforme del producto, que no se escurra líquido por la máquina.
- Aplicar la dosis de agroquímicos necesaria según la recomendación del técnico
- Observar periódicamente el cultivo para detectar a tiempos algún problema
- Registrar las aplicaciones que realizan en el cultivo
- Respetar el tiempo de espera para cada aplicación
- No ingresar al cultivo inmediatamente después de la aplicación
- Una vez terminada la aplicación, el trabajador debe ducharse y lavar los elementos de protección (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012)

Estas medidas, junto con el equipo de seguridad necesario para que los agroquímicos se puedan aplicar de manera segura (Figura 4) hacen muy probable que alguno de estos no se cumpla y presente un riesgo potencial para el personal aplicando el agroquímico.

Además, los pesticidas pueden entrar a través de la piel. En ambientes cálidos, causan sudoración, la cual por consiguiente causa un incremento en la absorción de la piel. (Fait, Iversen, Tiramani, Visentin, & Maroni, 2001)

1.3. Revisión de la literatura (Soporte de la investigación)

En 2011, (Tabile, y otros) desarrollaron un robot móvil con el objetivo de realizar tareas de reconocimiento en parámetros agronómicos de los cultivos brasileños más comunes (maíz, caña de azúcar, granos de soya y naranja) durante la mayoría de su ciclo de vida.

Debido a que su diseño no incluía que el robot realizara únicamente tareas de reconocimiento, no fue necesario el incluir equipo de alta potencia, únicamente se utilizó un grupo de sensores montados en el vehículo.

El modo de operación del vehículo consiste en trasladarse pasando entre los surcos de cultivo, de tal forma que los cultivos pasen por la parte central del vehículo, debido a esto, este se diseñó con forma de arco, usando ruedas como medio de traslado, montadas en las 4 esquinas de la estructura.

Los resultados del trabajo de (Tabile, y otros) se puede observar en la Figura 5, la cual muestra el prototipo construido en su investigación.



Figura 5: Prototipo de robot móvil agrícola. (Tabile, y otros, 2011)

Los resultados finales obtenidos del trabajo de (Tabile, y otros, 2011) fue el vehículo observado en la Figura 5, se logró el movimiento del robot móvil de manera exitosa, y los módulos de comunicación y navegación quedaron en etapa de desarrollo (en 2011, el momento de la publicación del artículo).

Otro trabajo más reciente en el campo de los robots agrícolas se observa con (Batista, y otros) quienes en 2017 publicaron el artículo con nombre “Multifunctional Robot at low cost for small farms”, el cual describe un robot fijo de geometría cartesiana, diseñado para atender un grupo de plantas en área de trabajo.

Las actividades que el robot realizaría son las de irrigación de las plantas por medio de un dispensador instalado en el cabezal del robot.



Figura 6: Prototipo de robot agrícola multifuncional de bajo costo. (Batista, y otros, 2017)

Otro de los objetivos del diseño era el de obtener el menor costo posible para el robot, esto incluía el uso de materiales baratos y accesibles localmente para los agricultores. Se realizaron pruebas con el prototipo construido, el cual se puede apreciar en la Figura 6.

El trabajo concluye denotando la posibilidad de reemplazar parte del personal agrícola con los robots de este tipo, ya que estos requieren intervención humana casi nula para operar, pero sólo si es posible desarrollar un robot de este tipo que sea de bajo costo.

1.4. Propuesta de la solución al problema

Considerando las investigaciones anteriores y en los requerimientos de la empresa ORNACOL en esta investigación se propone un Vehículo Terrestre No Tripulado (UGV) con capacidad de utilizar el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), transmisión de datos inalámbrica vía Wi-Fi, que a través de una interfaz de video se capaz de ser operado remotamente desde una posición segura realiza tareas de aplicación de agroquímicos, utilizando técnicas de agricultura de precisión, realizando rutinas de control autónomo, las cuales deben poder asignarse desde la interfaz de control remoto previamente mencionada. Las características del vehículo propuesto superan las limitaciones detectadas en los trabajos investigados en la revisión de la literatura.

Los componentes principales del vehículo a desarrollar se muestran en la figura 7 que consisten de dos módulos principales:

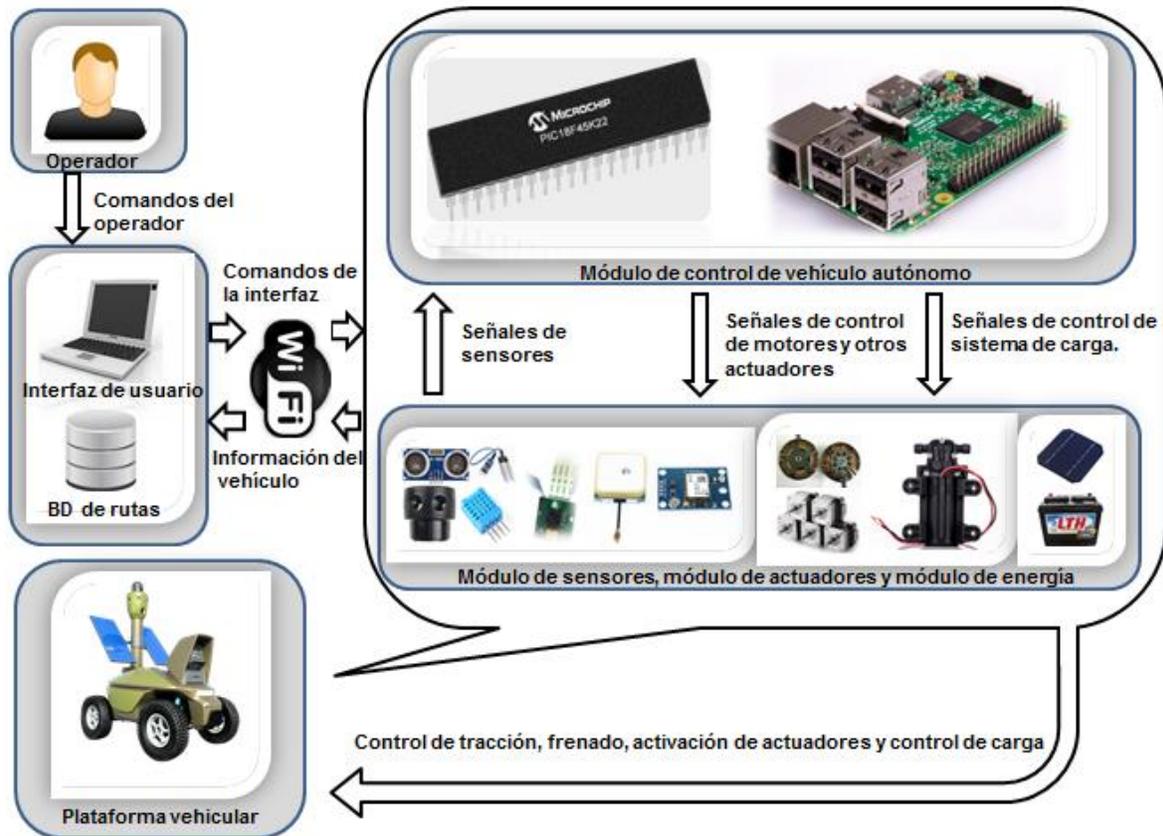


Figura 7: Esquema del modelo propuesto.

El módulo de cómputo: Este módulo se encarga del funcionamiento de la interfaz de video y transmisión de datos entre el usuario y el vehículo autónomo. Para ello, este módulo hará uso de la computadora Raspberry PI 3, la cual hará función de maestro en el vehículo autónomo, enviando comandos a otros módulos para controlar y obtener información de los diferentes componentes del vehículo.

El módulo de sensores: Arreglo de sensores para realizar el monitoreo de las variables de proceso pertinentes. Este módulo incluye sensores de:

- Distancia
- Temperatura
- Humedad
- Conductividad eléctrica
- GPS

El módulo de control: Este módulo hará uso de un microcontrolador de la marca Microchip modelo PIC18F26K40 encargado de realizar labores de bajo nivel dentro del vehículo, esto incluye:

- Control de motores y otros actuadores.
- Lectura de sensores.
- Comunicación con otros módulos de bajo nivel
- Control de los sistemas de alimentación del vehículo
- Funciones de seguridad
 - Baja batería
 - Sobrecalentamiento
 - Corto circuito
 - Sobrecarga

El módulo de control funcionará a modo de esclavo del módulo de cómputo, lo que significa que este sólo actuará al recibir órdenes del módulo de cómputo, y proporcionará información de los diferentes sensores del vehículo a este para la toma de decisiones.

En cuanto a la alimentación del vehículo, se decidió utilizar una batería de 12V para la operación de los sistemas en el vehículo.

En cuanto al sistema de tracción, se utilizarán motores sin escobillas para la propulsión del vehículo, utilizando un motor en cada rueda para así poder lograr el cambio de dirección.

La propuesta actual contempla el uso de un control utilizado para juegos de video para el control del vehículo en la interfaz de video, ya que se considera que estos son los más intuitivos para lograr un manejo cómodo del mismo.

Esta propuesta tiene el objetivo de proporcionar un medio que elimine el factor de riesgo del uso de agroquímicos dañinos para el ser humano, ya que su uso completamente remueve el elemento humano (ya no debe estar presente en el campo) en el proceso de aplicación de agroquímicos.

Además, la propuesta abre paso al uso de técnicas de automatización para la aplicación de agroquímicos, lo cual reduce la necesidad de personal, lo cual a su vez tiene el beneficio de la reducción de costos en el proceso de producción de plantas ornamentales que finalmente, aumenta el margen de utilidad del negocio.

1.5. Justificación

En México, el cultivo de plantas ornamentales tiene un gran potencial de ser una fuente de empleos para la población, el problema yace en que dicho potencial no se aprovecha, lo cual se refleja en las ventas de plantas ornamentales, teniendo un valor de \$51, 603, 661 dólares americanos en 2001, sin embargo, países con menor territorio tales como Colombia, Ecuador y Costa Rica tuvieron exportaciones al mercado norteamericano con valor de \$570.3; \$215.9 y \$161.0 millones de dólares respectivamente ese mismo año. (COEPPLANTS, 2012)

Muchos factores intervienen en este problema, al que se piensa atacar en este trabajo es el de la automatización de procesos la cual se verá en forma de la construcción del vehículo autónomo que será capaz de realizar ciertas tareas sin necesidad de la intervención humana, disminuyendo la necesidad de personal, reduciendo potencialmente los costos de producción y por tanto, aumentando el margen de ganancias de los productores agrícolas.

Otro problema atacado con este trabajo es el riesgo de la aplicación de agroquímicos peligrosos, los cuales serán aplicables por medio del vehículo, siendo este operado de forma autónoma o directamente de manera remota. De este modo se reducirá el riesgo de intoxicación por agroquímicos.

Otro beneficio de este trabajo es el que de la posibilidad de aplicar tecnologías de agricultura de precisión, lo cual permite la utilización más efectiva de los productos agroquímicos, lo cual por consiguiente producirá una mayor reducción en costos de producción, incrementando aún más el margen de ganancias de los productores agrícolas.

Además, es posible que el vehículo autónomo se pueda utilizar como plataforma de detección temprana de plagas, lo cual podría evitar pérdida de cosechas debido a la incapacidad de identificar una plaga antes de que genere daños en las plantas.

El estado de Colima posee Características climáticas favorables para el cultivo de varias especies de plantas ornamentales (COEPPLANTS, 2012), lo cual presenta la oportunidad perfecta para aplicar el proyecto. E caso de ser ejecutado de manera exitosa, el Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales promete traer muchos beneficios para los productores locales de plantas ornamentales (pertenecientes a ORNACOL), lo cual incrementará su competitividad en el mercado internacional.

1.6. Motivación

Las motivaciones para el desarrollo del Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales son:

- Reducir el esfuerzo requerido y los riesgos implicados con el proceso de aplicación de agroquímicos (tales como fertilizantes y plaguicidas) nocivos para el ser humano en la producción de plantas ornamentales.
- Experimentar alternativas a los métodos convencionales de producción de plantas ornamentales, con el objetivo de evaluar la posibilidad de en un futuro utilizar vehículos autónomos para el cuidado de las plantas en todas las áreas de la agricultura.
- Abrir paso a nuevas tecnologías en los campos mexicanos, permitiendo así la modernización del sector agrícola. El cual en su mayor parte se ha quedado atrás en el ámbito de la innovación tecnológica.
- Incrementar la competitividad de los productores de plantas ornamentales con otros países tales como Colombia, Ecuador y Costa Rica en el área de exportaciones a los Estados Unidos de América. y Canadá.

1.7. Hipótesis

El modelo de un Vehículo Terrestre No Tripulado (UGV) controlado en ambiente WEB capaz de realizar trabajos de aplicación de agroquímicos de manera autónoma promueve la competitividad de los productores de plantas ornamentales reduciendo los riesgos a la salud implicados al personal que realiza estos trabajos.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo general

Elaborar un modelo de Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales, implementando un sistema de control en ambiente WEB.

1.8.2. Objetivos específicos

1. Realizar el análisis preliminar del sistema
 - 1.1. Análisis de requerimientos.
 - 1.2. Estudio de factibilidad del sistema
2. Realizar el diseño del vehículo autónomo
 - 2.1. Diseño mecánico
 - 2.2. Diseño eléctrico
 - 2.2.1. Selección de motores y actuadores
 - 2.2.2. Selección de fuentes de energía
 - 2.3. Diseño electrónico
 - 2.3.1. Selección de controladores
 - 2.3.2. Selección de sensores
 - 2.3.3. Selección de medios de transmisión de datos
3. Realizar la construcción del prototipo del vehículo autónomo
 - 3.1. Ensamblaje
 - 3.2. Pruebas de desempeño
4. Programación de controladores del vehículo autónomo
5. Desarrollo de la interfaz de control remoto del vehículo autónomo
6. Pruebas finales y liberación del proyecto
 - 6.1. Documentación del sistema
 - 6.2. Operación del sistema

1.9. Descripción y organización del trabajo

La presente memoria de tesis está estructurada en capítulos, ordenados de tal forma que siguen el orden natural del desarrollo del Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales. El contenido de cada capítulo se muestra a continuación.

Primer capítulo (Introducción): El primer capítulo contiene información básica sobre el proyecto. Se analiza la naturaleza u el contexto del problema que da origen al proyecto desarrollado en esta tesis. Se le da soporte a la investigación con documentación de proyectos similares, analizando los resultados obtenidos y trabajos futuros de estos para así proponer una solución al problema basada en las experiencias obtenidas en dichas investigaciones.

Después se muestran la hipótesis del proyecto, junto con los objetivos generales y específicos. Finalmente, se muestra un resumen contenido del documento.

Segundo capítulo (Estado del campo del conocimiento): En el segundo capítulo se muestra inicialmente información histórica referente al proyecto, generando una línea de tiempo de la implementación de tecnologías en las actividades agrícolas, además de cómo y cuándo surgieron los conceptos de robots agrícolas. Después se muestran las investigaciones recientes que

involucran el uso de robots para el realizar actividades agrícolas. Finalmente se describen todos los conceptos relevantes para la investigación en el marco teórico.

Tercer capítulo (Métodos empleados): En el tercer capítulo se describen los métodos a utilizar para el desarrollo del proyecto. Se describen elementos tales como los materiales, herramientas de diseño, desarrollo y las técnicas de manufactura necesarias para llevar a cabo el prototipo del vehículo autónomo.

Cuarto capítulo (Desarrollo): Este capítulo contiene todos los procedimientos realizados para llegar al desarrollo del prototipo del vehículo autónomo, así como los sistemas externos necesarios para su operación. El capítulo inicia con el diseño mecánico del vehículo autónomo, en dónde se muestran los componentes estructurales del vehículo. Después, el diseño electromecánico y electrónico del vehículo ilustra los componentes tales como motores, bombas y otros actuadores que se utilizan en el vehículo autónomo. Finalmente, el diseño de la interfaz de control del vehículo muestra la manera en la que el vehículo interactúa con el usuario, y los métodos utilizados para lograrlo.

Quinto capítulo (Pruebas): Una vez concluida la construcción del prototipo del vehículo autónomo, el capítulo 5 muestra el desarrollo de las pruebas de funcionamiento realizadas para el seguimiento autónomo de rutas predefinidas .

Sexto capítulo (Análisis de resultados): Este capítulo contiene un resumen de los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de desempeño realizadas en el capítulo anterior, comparando los resultados con los obtenidos en proyectos anteriores (ilustrados en el Capítulo 2).

Séptimo capítulo (Conclusiones y trabajo futuro): El capítulo final del documento, las conclusiones exponen desde un punto de vista analítico el nivel de éxito que el proyecto tuvo. Se presentan las observaciones sobre las áreas de oportunidad que tuvo el proyecto y se presentan propuestas de trabajos futuros para dar continuación al desarrollo del vehículo autónomo.

2. Estado del campo de conocimiento

Antes de describir el desarrollo del proyecto, es necesario clarificar el contexto, así como los conceptos más relevantes de este. En este capítulo se muestra los antecedentes y conceptos que rodean el tema de los vehículos agrícolas autónomos. Así como el contexto en el que se desarrollará el proyecto.

2.1. Marco histórico

2.1.1. La agricultura en la antigüedad

El desarrollo agrícola ha sido un factor importante en el desarrollo de la sociedad humana desde su inyección hace miles de años. Esta tuvo un impacto enorme en el modo de vida del hombre en ese entonces, el cual obtenía un sustento principalmente basado en la recolección y la caza, lo que los obligaban a tener un estilo de vida nómada.

Conforme la agricultura se desarrollaba surgieron nuevas técnicas como la rotación, selección e hibridación de cultivos, las cuales tienen el objetivo de incrementar la consistencia, calidad y volumen de los productos agrícolas. Estas técnicas fueron cambiando el ecosistema del entorno en donde se realizaban las actividades agrícolas, esto se debe a las prácticas utilizadas para mejorar las condiciones de los cultivos, las cuales incluían la remoción de la vegetación nativa presente en el área con el objetivo de incrementar el valor nutricional del suelo para los cultivos.

En los últimos milenios, técnicas como la domesticación, selección e hibridación de los cultivos ha llevado a cambios significativos en la apariencia y valor nutricional de los cultivos. Por ejemplo, en la horticultura la diversidad es altamente valorada, lo cual lleva a los horticultores a preservar las plantas que se destacan por atributos inusuales, ya sean en color, forma o textura. (Thrall, Bever, & Burdon, 2010)

2.1.2. La mecanización agrícola

Con el paso de los años, estas técnicas fueron complementadas por desarrollos tecnológicos que lograban incrementar los rendimientos y la producción agropecuaria global, aumentar la productividad de la mano de obra rural, así como mejorar el confort de los trabajadores y disminuir la tediosidad del trabajo y el esfuerzo productivo, tales como al arado y el tractor. (Cáceres, 2015)

La implementación de estos avances llevaron a lo que se conoce como mecanización agrícola, la cual según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) abarca la fabricación, distribución y

funcionamiento de todos los tipos de herramientas, aperos y máquinas de cultivo. La mecanización agrícola es fundamental para el incremento de la producción, ya que permite aumentar el área cultivada, mejorar las técnicas de cultivos, bajar costos y dignificar el trabajo humano.

Además, la mecanización del campo promueve el crecimiento económico a través de mayores crecimientos por hectárea, así como la posibilidad de realizar más de una siembra por año.

Sin embargo, es importante notar que la mecanización agrícola no siempre lleva consigo una ventaja significativa con respecto a las técnicas tradicionales, debido a que la maquinaria agrícola, la cual es un producto intensivo en capital, está diseñada para cultivar amplias extensiones de tierra para ser redituables, de no contar con estas, dicha maquinaria pasaría ociosa la mayor parte del ciclo agrícola, haciéndolas una solución no rentable respecto a la inversión inicial. Este es el caso del minifundio mexicano, el cual consiste de pequeños parches de tierra utilizada con fines agrícolas. (Negrete, 2011)

2.1.3. Los agroquímicos

Otra de las tecnologías más importantes de implementadas en la agricultura moderna son los agroquímicos, entre ellos, los pesticidas o plaguicidas, sustancias las cuales pertenecen a un conjunto de grupos químicos caracterizados por una estructura química específica llamada sustancias activas, las cuales son incluidas en la composición de productos disponibles comercialmente, cuya propiedad básica es la de ser tóxico o letal contra un organismo en particular.

Basados en el organismo objetivo, los pesticidas se dividen en varios grupos, incluyendo, pero no limitado a: insecticidas (Insectos), acaricidas (acáridos), nematocidas (nematodos, plantas parásito), molusquicidas (moluscos) y rodenticidas (roedores). También existe un grupo separado conocido como herbicidas, los cuales sirven para el control de hierbas, así como los fungicidas, los cuales previenen enfermedades causadas por hongos.

Clasificando a los pesticidas por su objetivo, se tienen 3 grupos principales, los atrayentes, diseñados para atraer a cierto tipo de organismo, los repelentes, diseñados para alejar al organismo objetivo, así como los letales, diseñados para matar al organismo objetivo.

El uso de los plaguicidas, data desde el año 2500 A.C, en dónde los sumerios utilizaban un compuesto de sulfuro de olor intenso en su piel, con el objetivo de repeler a los insectos. En la Asiria antigua, en el año 2000 A.C., en dónde los granjeros estaban obligados a proveer una cierta cantidad de saltamontes, así como sus huevos. En el antiguo Egipto, el año 1500 A.C. se escribió el documento

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

denominado “El papiro Ebers”, el cual contenía más de 800 recetas, entre las cuales estaban incluidas varias sustancias que actuaban como venenos y pesticidas. En el año 1000 A.C. según Homero, era común que la gente fumigara sus casas con un compuesto generado al quemar sulfuro, el cual es el precursor de los fungicidas basados en sulfuro utilizados hoy en día.

En el año 1939, el químico suizo Miller se desarrolló el compuesto de Dicloro Difenil Tricloroetano, también conocido por sus siglas como DDT lo cual últimamente le otorgaría el premio Nobel en 1948. El DDT es un químico barato, fácil de sintetizar así como un poderoso insecticida y plaguicida. La combinación de efectividad, bajo costo y amplio campo de aplicación le dio al DDT el apodo de “polvo maravilla” en ese entonces.

El problema que suponía el DDT se hizo presente unas décadas después de su implementación, cuando se hizo notar que este persistía en el ambiente (vida media de 60 años) y al ser una sustancia altamente tóxica para humanos y animales que actúa al contacto, generó una variedad de problemas tanto para el ecosistema como para las poblaciones adyacentes. Lo anterior causó que el DDT sea hoy considerado como uno de 12 “contaminantes persistentes”, caracterizados por su alta durabilidad y habilidad para desplazarse por el medio ambiente y acumularse en el tejido graso de organismos vivos. Actualmente, el DDT está prohibido en la mayoría de los países, además, los insecticidas utilizados actualmente utilizan una cantidad de compuesto activo, las cuales pueden ser tan bajas como 0.01 Kg/Ha, un valor mucho menor a la de los años del DDT (3 Kg/Ha). (Banaszkiewicz, 2010)

Los agroquímicos son usados alrededor del mundo para proteger las cosechas, la forma de aplicación de estos puede involucrar el uso de maquinaria simple como bombas de mano hasta el uso de aeronaves. Las sustancias en uso también varían y pueden estar en forma de polvos, granos, líquidos o gases, muchos son venenosos o nocivos para humanos, ganado, la fauna local y el medio ambiente a través de efectos tóxicos y/o corrosivos, riesgo de explosión e incendios. El uso indiscriminado puede resultar en la contaminación del aire, el agua y el suelo, también puede resultar en altos niveles residuales en los productos agrícolas que son posteriormente consumidos así como la contaminación del agua potable. (International Labor Organization (ILO), 1991)

La seguridad en el uso de agroquímicos ha sido una de las preocupaciones principales de varios gobiernos, organizaciones internacionales patrones y trabajadores del sector agrícola. Algunos agroquímicos como los pesticidas son extremadamente dañinos a la salud de los trabajadores y el público en general y el medio ambiente. Sin embargo pueden utilizarse de forma segura si se toman las

precauciones pertinentes. En el caso de los países con industrias altamente desarrolladas el uso de agroquímicos está altamente restringido, particularmente para aquellos que son más peligrosos. Este no es el caso para países menos desarrollados donde el beneficio de eliminar una plaga en particular sobrepasa los riesgos implicados con el uso de los agroquímicos, estas son las áreas donde el uso de UGV y técnicas de agricultura de precisión trae el mayor beneficio, haciendo uso eficiente de los agroquímicos y reduciendo drásticamente el riesgo de exposición a estos. (International Labor Organization (ILO), 1991)

2.1.4. La agricultura de precisión

El concepto de la agricultura de precisión surgió a finales de la década de 1980 con la implementación de sistemas de aplicación de fertilizantes basado en una matriz de muestras que determinaban las propiedades químicas del suelo, esto con el objetivo de complementar la capacidad del equipamiento con volumen de aplicación variable (VRA por sus siglas en inglés:). Con ayuda de instrumentos sencillos tales como brújulas y navegación por estima (conocido en inglés como *dead reckoning*). Durante este tiempo, las tecnologías de monitoreo de producción aún estaban en su fase de desarrollo.

Alrededor de 1990, el Sistema de Posicionamiento Global NAVSTAR (GPS por sus siglas en inglés) se volvió disponible de manera limitada para usos civiles. Este sistema provee una forma rápida y suficientemente precisa de localizar y navegar un vehículo, lo cual inició una multitud de actividades. Se construyeron controladores electrónicos que combinaban la tecnología VRA con el sistema GPS, al mismo tiempo, los primeros sistemas de monitoreo de producción salieron al mercado. Para 1993, el sistema GPS estaba completamente operacional y algunos sistemas de monitoreo de producción permitían la medición precisa de cambios en la producción entre los diferentes campos de cosecha. La combinación de los datos de producción con la información de los nutrientes en el suelo marcó el inicio de la agricultura de precisión en el área de cosechas a gran escala.

En vista del éxito y potencial para mejorar de la agricultura de precisión en la industria de granos, otras industrias agrícolas, particularmente en área de la viticultura y horticultura, decidieron adoptar la agricultura de precisión. Desde los años 1990 se ha realizado más y más investigación en cosechas diferentes de las de granos. Además, cada vez se le da un mayor énfasis a la capacidad de monitorear el impacto ambiental de las actividades agrícolas, así como de facilitar la trazabilidad de los productos.

Los avances en el Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés) a partir de 1999 han habilitado técnicas de guiado en la

maquinaria agrícola, tales como el giro automático y la agricultura de tráfico controlado (CTF por sus siglas en inglés). Las técnicas CTF proveen considerables beneficios tanto como económicos (minimización de compactación de suelos) y sociales (reducción de fatiga para los conductores). Debido a todos los beneficios que ofrece, la tecnología de agricultura de precisión ha mostrado altos niveles de adopción en la primera década del siglo 21. (Grains Research and Development Corporation (GRDC), 2010)

Actualmente, está comprobado que la agricultura de precisión incrementa el volumen de las cosechas, por ejemplo, al monitorear los niveles de nitrógeno del suelo es posible disminuir el uso de fertilizante en 25% sin afectar la productividad de las cosechas. (Tokekar, Vander Hook, Mulla, & Isler, 2016)

A pesar de los beneficios que provee la agricultura de precisión su implementación puede resultar ser un proceso complicado debido a los costos implicados, particularmente en zonas donde los productores carecen de recursos económicos para implementar alguna de las soluciones existentes, viéndose forzados a implementar técnicas tradicionales de baja tecnología y eficiencia, una situación recurrente para el sector agrícola en México.

La investigación de Koutsos & Menexes realizó un análisis económico, agronómico y ambiental en 83 casos de implementación técnicas y métodos de agricultura de precisión tales como el monitoreo de variables de proceso, aplicación precisa de agroquímicos y el uso de sistemas de guía autónoma. El estudio muestra que en la mayoría de los casos, la aplicación de estas técnicas provee beneficios económicos y ambientales por medio de la reducción del uso de recursos como fertilizantes, agua y pesticidas así como una reducción en los costos de mano de obra.

2.2. Marco contextual

Entre otras cosas, la sección anterior describe los inicios y primeras manifestaciones de la agricultura de precisión, esto incluye la implementación de técnicas de guiado para la maquinaria agrícola, esto es, que la maquinaria se desplace y realice su trabajo sin necesidad de ser controlada por el usuario en todo momento, esto le da un cierto grado de autonomía al vehículo dependiendo de la complejidad de las técnicas empleadas. Es posible alcanzar un nivel de complejidad tal que la maquinaria agrícola no requiera de un conductor operándola directamente, de ser así, entonces se considera a este vehículo como un UGV.

Recientemente, se han realizado una multitud de investigaciones en el tema de los UGV agrícolas. Esta sección describe algunos de los UGV desarrollados en publicaciones científicas, su desarrollo, función, resultados obtenidos.

2.2.1. Sistema de sensores integrados para el monitoreo de las condiciones de crecimiento en el arroz basado en un Sistema de vehículo terrestre no tripulado.

En abril de 2014, (Pei, y otros) publicaron el trabajo que describe la implementación de un UGV equipado con una variedad de sensores para el monitoreo de cultivos de arroz (figura 8).



Figura 8: Plataforma UGV equipada con sensores, trabajando en los campos de arroz (Pei, y otros, 2014)

La estructura del UGV utilizado se diseñó para ser ligero para así poder desplazarse a través de los surcos de cultivos, para ello, se implementó una estructura de altura y ancho variable, lo que proporciona la flexibilidad para utilizarse en campos con diferentes dimensiones de surco, así como adaptarse a cultivos en diferentes etapas de crecimiento.

La suspensión consiste de una junta rotatoria tridimensional posicionada entre los dos ejes del UGV, esto es, una junta de rótula que permite el giro de dos grados de libertad basado en un punto, esto le permite al vehículo omitir el uso de resortes como sistema de suspensión. El diseño además incluía un motor de

combustión interna con motivos de generación de energía, sin embargo este está ausente del prototipo mostrado en la figura 8.

El UGV está equipado con una variedad de sensores, las cuales consisten de un sistema GreenSeeker R100, un espectro radiómetro FieldSpec y un sensor de temperatura infrarrojo. Los instrumentos tenían el propósito de calcular el índice normalizado de diferencia vegetativa y el índice de área de hojas (NVDI y LAI por sus siglas en inglés respectivamente) por varios métodos.

Los resultados indican que existe una relación positiva entre el NVDI y el LAI, lo cual concuerda con trabajos de otros investigadores. También se comprobó la mayor confiabilidad de obtención de estos parámetros usando el UGV que por métodos convencionales.

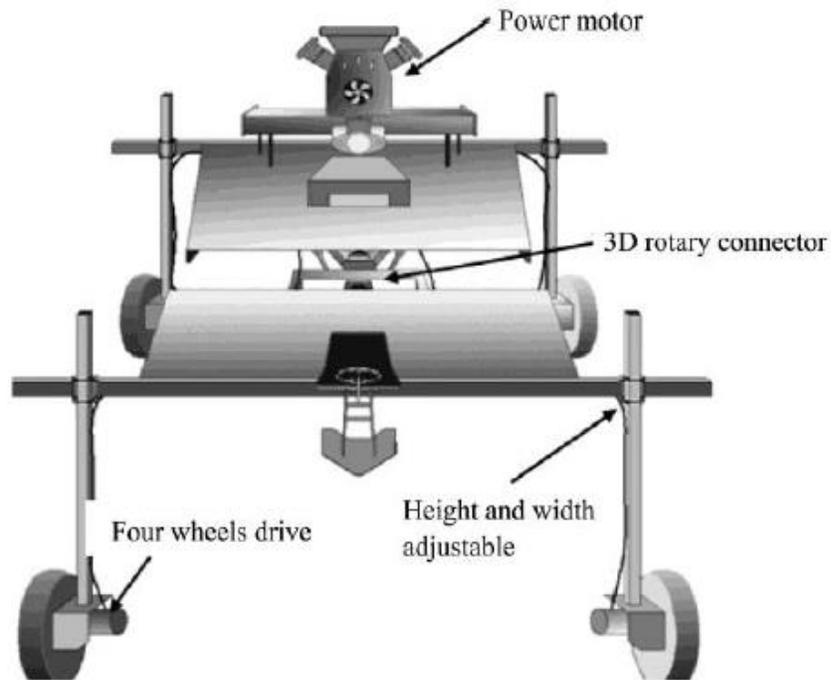


Figura 9: Diseño de la plataforma UGV (Pei, y otros, 2014).

2.2.2. Sistema robótico para cosecha de arrozales en Japón

En 2013 (Tamaki, y otros) publicaron un trabajo ilustrando la implementación de una solución totalmente automatizada para la producción de arroz a gran escala en los campos de Japón.

El artículo justifica el trabajo con el rápido envejecimiento de la población agrícola en Japón, lo cual está llevando a una disminución en la oferta de la mano de obra en las comunidades agrícolas. Dicha población disminuyó de 4.6 millones en 1990 a 2.6 millones en 2010. Otro argumento utilizado para soportar el trabajo es el tamaño de los campos agrícolas en el la nación, la cual es de mucho menor tamaño que la usada en otros países y por tanto ineficiente al implementarse en los campos de reducidas dimensiones previamente mencionados.

La solución implementada consiste en tres sistemas de UGV, cada uno cumple con una tarea diferente en el proceso de producción de arroz. El primero de ellos es un tractor robótico, mostrado en la figura 10



Figura 10: Tractor robótico (Tamaki, y otros, 2013).

La siguiente plataforma UGV consiste de un robot trasplantador de arroz, mostrado en la figura 11.



Figura 11: Robot trasplantador (Tamaki, y otros, 2013).

La última plataforma UGV implementada consiste en un robot cosechador, encargado de extraer el arroz de las plantas maduras e insertarlo en un contenedor como se puede apreciar en la figura 12.



Figura 12: Robot cosechador (Tamaki, y otros, 2013).

Para obtener un sistema de guía autónomo se emplearon tecnologías tales como la cinemática de tiempo real (RTK por sus siglas en inglés: *Real Time Kinematics*), el sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés: *Global Positioning System*), brújula GPS entre otros. Todos los módulos se comunican entre sí por medio de una interfaz basada en el protocolo de comunicación CAN-bus como se observa en la figura 13. Además, se desarrolló un software para la generación de rutas.

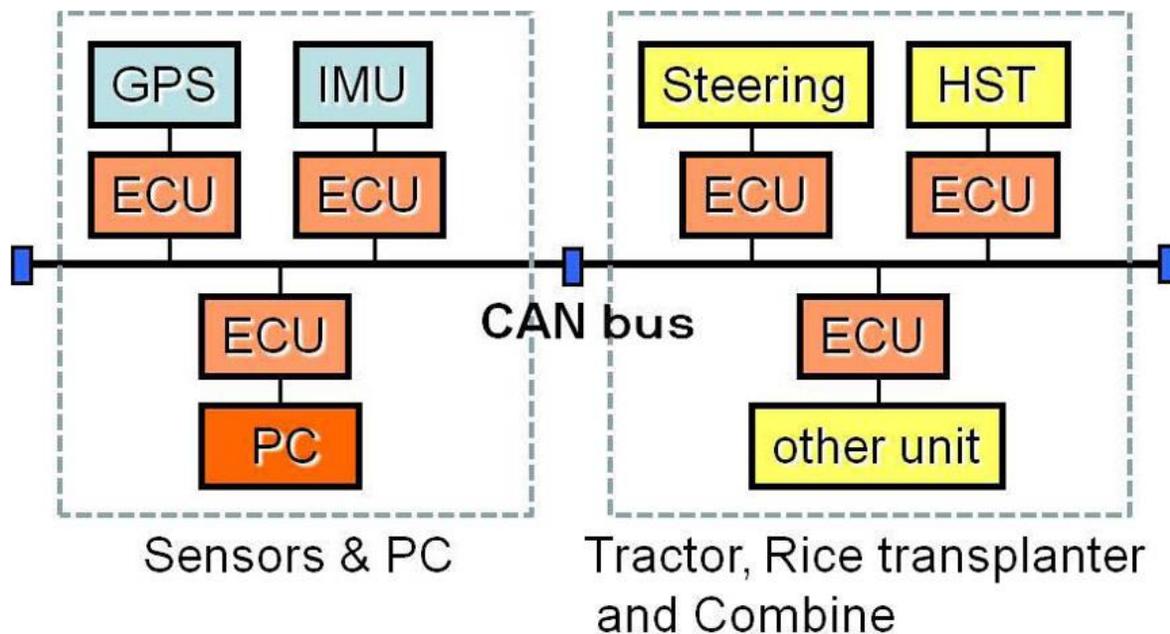


Figura 13: Diagrama de bloques de las plataformas robóticas (Tamaki, y otros, 2013).

Se realizaron rutas piloto para la cosecha de granos de soya, y el trasplante de arroz, los cuales mostraron desviaciones laterales promedio de 0.04 m y un error angular de 1.1 °, además se discutieron la viabilidad del transporte entre campos, en dónde se comprobó la viabilidad del traslado autónomo de los UGV contra el traslado por medio de un camión de carga siempre y cuando la distancia entre campos sea menor a 1.76 Km como se muestra en la figura 14.

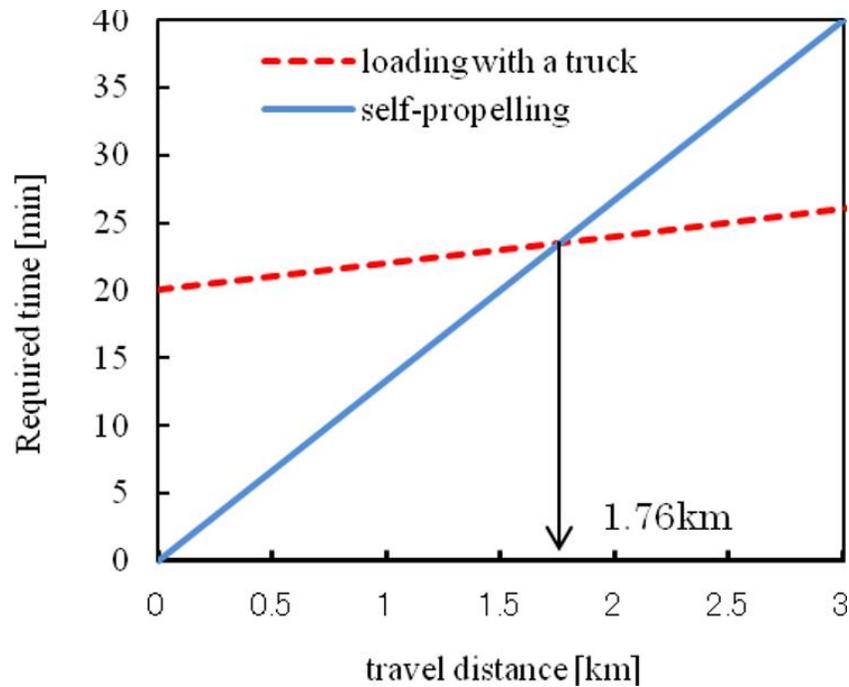


Figura 14: Comparación de tiempo requerido para el traslado de los UGV entre campos (Tamaki, y otros, 2013).

2.2.3. Desarrollo de un Sistema de guía para maquinaria agrícola basada en GPS y GIS

En 2010, (Weidong, Chun, & Jing) publicaron un artículo sobre el un sistema de guía asistida para los conductores de maquinaria agrícola utilizando el sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés: *Geographic Information System*), junto con tecnologías GPS y una interfaz gráfica asisten al conductor de la maquinaria agrícola indicando la dirección que debe tomar para completar el recorrido en conformidad con una ruta predefinida.

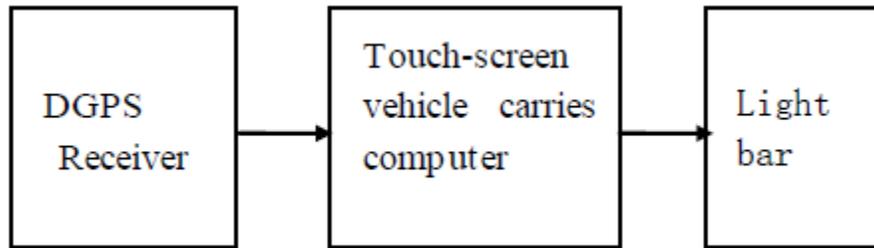


Figura 15: Estructura de hardware para el sistema de guía asistida (Weidong, Chun, & Jing, 2010).

El sistema desarrollado por (Weidong, Chun, & Jing), cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 15, consiste de tres componentes principales, un receptor GPS, la computadora integrada en la maquinaria agrícola y una barra de diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés: *Light Emitting Diode*) la cual funciona como indicador de la dirección a seguir, mostrado en la figura 16. Esta barra enciende los tres LED centrales cuando no hay desviación de la ruta, conforme se incremente la desviación de la ruta predefinida, los LED irán encendiendo en la dirección que el conductor debe girar para cambiar la ruta a la predefinida.



Figura 16: Barra de LED de guía (Weidong, Chun, & Jing, 2010).

El trabajo realizado por (Weidong, Chun, & Jing) comprueba la confiabilidad de las tecnologías GPS y GIS para asistir a los conductores a guiar la maquinaria

agrícola por la ruta óptima. Además facilitar la información de las rutas recorridas por la maquinaria, lo cual facilita la obtención de datos estadísticos.

2.3. Marco teórico

En esta sección se describen los conceptos y tecnologías relevantes con esta investigación.

2.3.1. Agricultura de precisión

Este es un concepto usado en la agricultura el cual consiste en la administración de las actividades agrícolas en base a la medición, con el objetivo de mejorar los beneficios económicos y reducir el impacto en el medio ambiente (Vargas Gonzalez, 2017). Para ello se aplican varias tecnologías tales como las redes de sensores inalámbricas y los vehículos no tripulados, tanto aéreos como terrestres.

Hoy en día, varias operaciones agrícolas han sido automatizadas, además existen múltiples productos robóticos y maquinaria automática disponible comercialmente. Algunas de las operaciones más importantes sujetas a investigación de automatización son los procesos de siembra, eliminación de hierbas y aplicación de agroquímicos. (Naik, Shete, & Danve, 2016)

2.3.2. Sistemas no tripulados

Los sistemas no tripulados pueden ser ya sea autónomos u operados remotamente. Dependiendo de las especificaciones del sistema, algunos son capaces de realizar ciertas tareas de manera autónoma tales como navegación y detección de objetivos. Los sistemas no tripulados permiten a los operadores evitar situaciones riesgosas mientras que estos son capaces de ingresar datos o monitorear la misión desde una distancia segura. (Abu Dhabi Autonomous Systems Investments (ADASI), 2014)

2.3.3. Vehículo aéreo no tripulado

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV por sus siglas en inglés: *Unmanned Aerial Vehicle*) es una aeronave que no requiere ser piloteada localmente, sino que es controlada a distancia por un piloto remoto o es controlada de manera autónoma basada por medio de misiones definidas inicialmente.

2.3.4. Sistemas autónomos

Un sistema autónomo es aquel que puede ser programado para llevar a cabo una misión operacional en específico (con cierto nivel de autonomía) bajo el control y guía de un operador humano en nivel de misión. (Abu Dhabi Autonomous Systems Investments (ADASI), 2014)

2.3.5. Algoritmo

Término creado en el siglo IX por el matemático persa Mohammed al-KhoWârizmi, es un **método para resolver un problema** que describe una secuencia ordenada de pasos **sin ambigüedades** que conducen a la solución del problema dado. La resolución de un problema exige el diseño de un algoritmo que resuelva el problema propuesto.

Todo algoritmo debe cumplir las siguientes características fundamentales:

Es preciso. Indica el orden de realización de cada paso

Está bien definido. Si se sigue un algoritmo dos veces, este debe producir el mismo resultado.

Es finito. Si se sigue un algoritmo, este debe terminar en algún momento; o sea, tener un número finito de pasos. (Joyanes Aguilar, 2008)

2.3.6. Lenguaje de programación

Es el lenguaje en el que se escriben los programas, las operaciones que conducen a expresar un algoritmo de forma programada se conocen como **programación**. Los **programadores** son los escritores y diseñadores de programas.

El proceso de traducir un algoritmo en pseudocódigo en lenguaje de programación se conoce como **codificación**. El proceso de resolución de un problema de programación se ilustra en la figura 17. (Joyanes Aguilar, 2008)

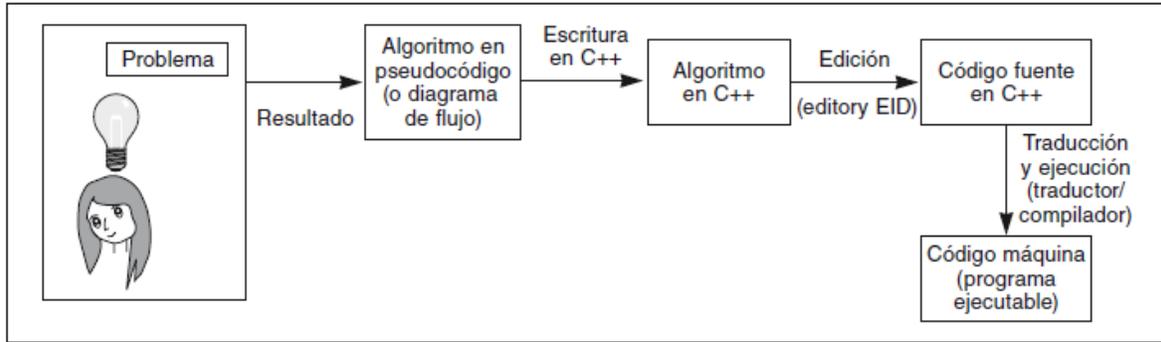


Figura 17: Procedimiento para solucionar un problema de programación. (Joyanes Aguilar, 2008)

2.3.7. Lenguaje de programación

Es un **programa que traduce código** escrito en lenguajes de alto nivel a lenguaje máquina en un proceso denominado **compilación**. El resultado del proceso de compilación es un programa llamado ejecutable que se puede utilizar cuantas veces se desee en la computadora sin necesidad utilizar el compilador nuevamente. (Joyanes Aguilar, 2008)

2.3.8. Pseudocódigo

Es una **herramienta de programación** en la que las instrucciones se escriben en palabras similares al inglés (o español), que facilitan tanto la lectura como la escritura de programas.

En esencia, el pseudocódigo se puede definir como **un lenguaje de especificaciones de algoritmos**. No existen reglas definidas para la escritura de pseudocódigo sin embargo, existen convenciones usadas para estandarizar el pseudocódigo que se pueden seguir si se desea. La figura muestra un ejemplo de un algoritmo en pseudocódigo. (Joyanes Aguilar, 2008)

```
Algoritmo Sumatoria
  Definir N,Suma,Num,Contador Como Entero
  Suma<-0
  Contador<-0
  Escribir "Cuantos números va a sumar?"
  Leer N
  Mientras Contador<N Hacer
    Contador<-Contador+1
    Escribir "Introduzca el número ",Contador
    Leer Num
    Suma<-Suma+Num
  FinMientras
  Escribir "El resultado de la suma es: ",Suma
FinAlgoritmo
```

Figura 18: Pseudocódigo. (Joyanes Aguilar, 2008)

2.3.1. Electrónica de potencia

E la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y conversión de la energía eléctrica. La electrónica de potencia combina la energía, la electrónica y el control para manipular el flujo de la energía eléctrica en una aplicación en particular. La parte de energía tiene que ver con el equipo de potencia estática y rotativa, para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. La electrónica ocupa los dispositivos y circuitos de estado sólido requeridos en el procesamiento de las señales para cumplir con los objetivos de control deseado. La figura 17 muestra la relación entre la energía, la electrónica y el control. (Rashid, 1995)

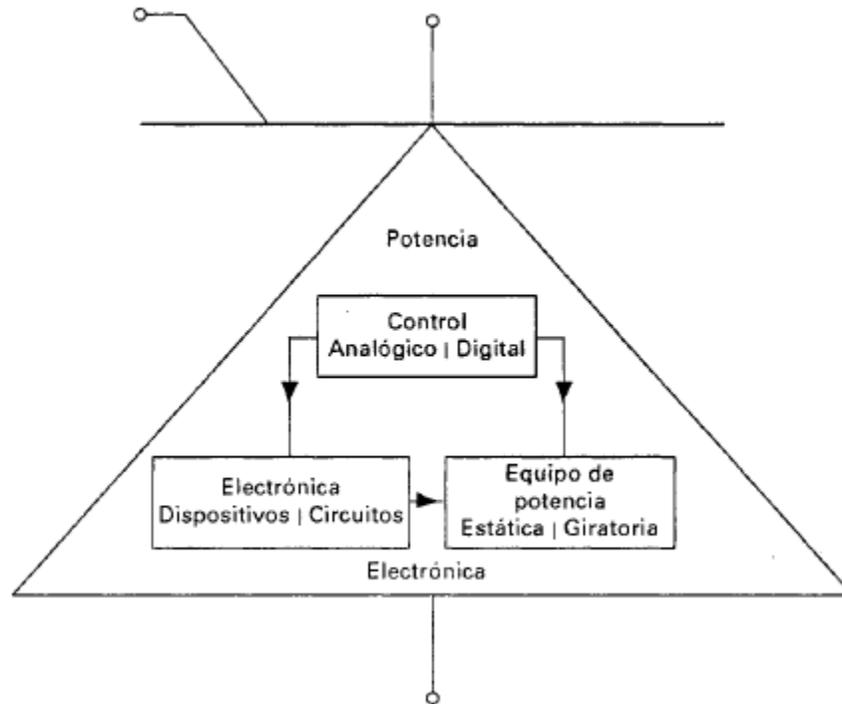


Figura 19: Relación de la electrónica de potencia con la energía, la electrónica y el control.
(Rashid, 1995)

La electrónica de potencia se basa en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia. Con el desarrollo de la tecnología de los semiconductores de potencia, las capacidades de manejo de energía y velocidad de conmutación han mejorado tremendamente. Asimismo, el desarrollo de la tecnología de microprocesadores y microcomputadoras tiene un gran impacto sobre el control y la síntesis de las estrategias de control para los dispositivos semiconductores de potencia. (Rashid, 1995)

Comparado con tecnologías anteriores, el equipo de electrónica de potencia moderno usa semiconductores de potencia que pueden compararse con el músculo y componentes de micro-electrónica que pueden compararse con el cerebro. (Rashid, 1995)

2.3.2. Conmutación

Un componente que permite la elección entre dos tipos de funcionamiento: cortocircuito y circuito abierto, funcionando alternativamente entre cada uno de ellos. Dicho régimen de funcionamiento se le denomina como conmutación. (Ballester & Piqué, 2012)

2.3.3. Rectificador de diodos

Hace referencia al circuito que convierte el voltaje de corriente alterna (CA) en un voltaje fijo de corriente directa (CD) como se puede apreciar en la figura 17. El voltaje de entrada al rectificador puede ser monofásico o trifásico. (Rashid, 1995)

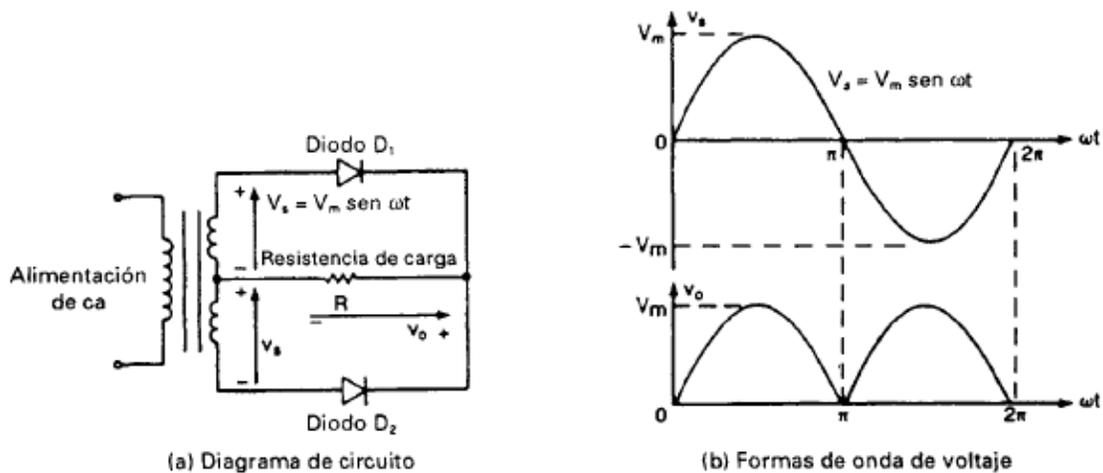


Figura 20: Circuito rectificador monofásico (Rashid, 1995)

2.3.4. Convertidores CD-CD

También conocidos como pulsadores o regulador de conmutación. La figura 18 muestra cómo estos dispositivos varían el voltaje de salida por medio de la regulación del tiempo de conducción t en el transistor Q_1 . Si T es el periodo de corte, entonces $t_1 = \delta T$ en donde δ es conocido como el ciclo de trabajo. (Rashid, 1995)

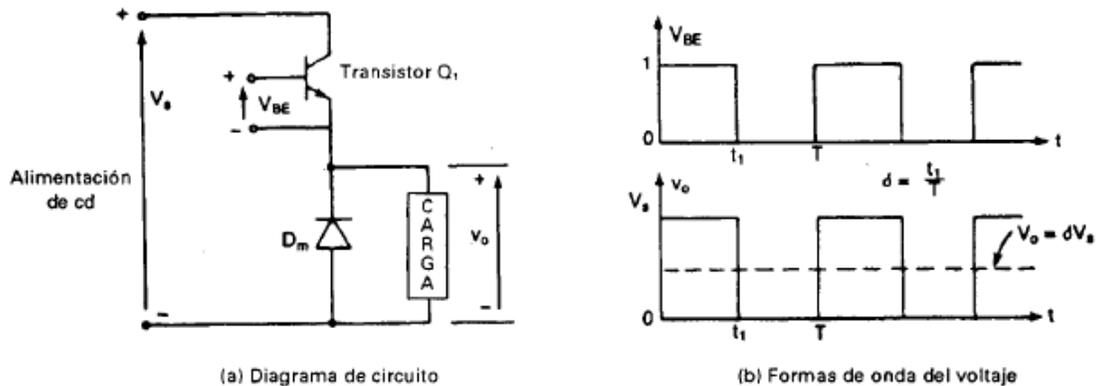


Figura 21: Conversor CD-CD (Rashid, 1995).

2.3.5. Transistores de potencia

Estos son dispositivos semiconductores utilizados como elementos conmutadores en circuitos electrónicos. La conmutación se logra por medio de la inducción de voltaje en una terminal de activación cuyo nombre varía dependiendo del dispositivo en cuestión. La velocidad de conmutación de los transistores modernos es mucho mayor que la de los tiristores, otro dispositivo semiconductor similar a los transistores, por lo cual estos son preferidos en aplicaciones de alta frecuencia, mientras que los tiristores son preferidos en aplicaciones que requieran altos flujos de corriente. (Rashid, 1995)

Cada familia de transistores tiene ciertas limitaciones, restringiendo sus potenciales aplicaciones. Las características y especificaciones de cada uno de estos tipos deberán examinarse para determinar su adecuación a una aplicación en particular. (Rashid, 1995)

2.3.5.1. Transistor de unión bipolar

Un transistor de unión bipolar (BJT) es formado una segunda región P o N a un diodo semiconductor PN. Cuando se tienen dos regiones N con una P, se forma lo que se conoce como transistor NPN, mientras que con dos regiones P y una N se forma un transistor PNP. Como se muestra en la figura 19, las tres terminales en los BJT consisten en colector, base y emisor. El BJT es un dispositivo controlado por corriente, esto es, que la respuesta de este se basa en cuanta corriente fluye por su terminal base así como otros factores tales como la ganancia β y la temperatura de la unión. (Rashid, 1995)

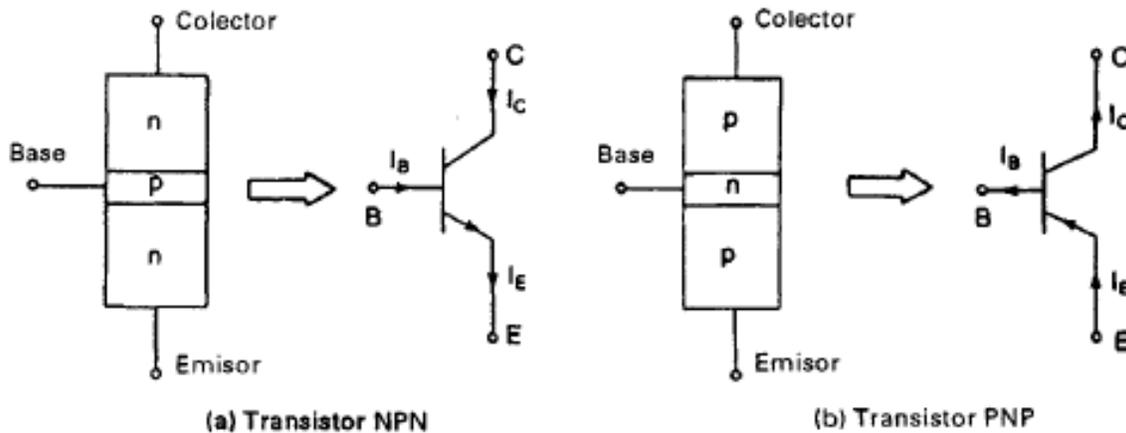


Figura 22: Clasificación de BJT.

En un transistor NPN existen tres regiones de operación: de corte, activa y saturación, en la región de corte, el transistor está desactivado ya que la corriente en la base no es suficiente, en la región activa, el transistor actúa como un amplificador de corriente, en donde la corriente que fluye entre el colector y emisor es proporcional a la que existe entre la base y el emisor multiplicada por una ganancia, en la región de saturación, la corriente en la base es suficientemente fuerte para que el transistor se comporte como un interruptor. (Rashid, 1995)

2.3.5.2. MOSFET de potencia

Mientras que los BJT son dispositivos controlados por corriente, un Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) es un dispositivo controlado por voltaje, lo que significa que se requiere sólo una pequeña corriente de entrada lo cual le permite a los MOSFET velocidades de conmutación muy altas, en el orden de los nanosegundos. Gracias a esto, los MOSFET son ideales para aplicaciones de alta frecuencia y baja potencia. Sin embargo, los MOSFET son más vulnerables que los BJT a las descargas electrostáticas, además de la dificultad de protegerlos ante el evento de un corto circuito. (Rashid, 1995)

Existen dos tipos de MOSFET: Los MOSFET de agotamiento y los MOSFET de enriquecimiento, los cuales esencialmente funcionan como dispositivos normalmente cerrados y dispositivos normalmente abiertos respectivamente. Además los MOSFET se clasifican basándose en el acomodo de los substratos semiconductores de canal N y canal P, de este modo teniendo cuatro posibles configuraciones para un MOSFET, las cuales se muestran en la figura 20.

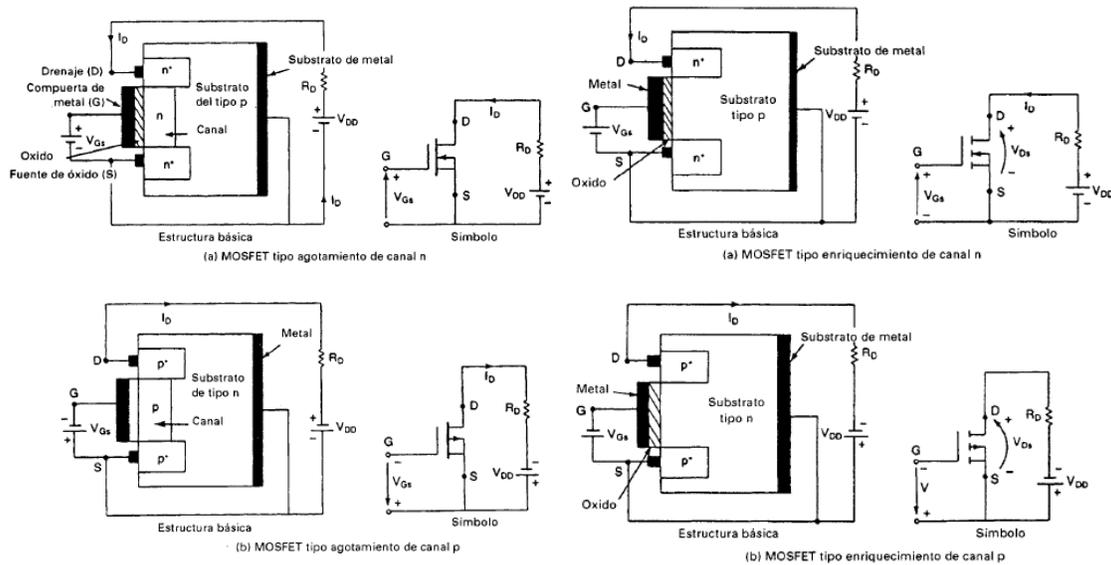


Figura 23: Clasificación de MOSFET.

2.3.6. Puente H

Un puente H es un circuito que consiste de un arreglo de interruptores, generalmente transistores, que por medio de conmutación permite seleccionar entre dos entradas de voltaje a una salida en particular. El puente H obtiene su nombre de la forma que toma su diagrama, el cual consiste de dos "Medio puente H" como el que se muestra en la figura 21. Estos circuitos son comúnmente utilizados para el control de motores de CD, en la construcción de inversores, así como en la elaboración de circuitos más complejos tales como los puentes H en cascada (CHB del inglés: *Cascading H Bridges*). Los dispositivos semiconductores de potencia varían dependiendo de la aplicación. Se utilizan MOSFET de potencia en aplicaciones de bajo voltaje y alta frecuencia, BJT en aplicaciones de baja a mediana potencia y frecuencia, e IGBT en aplicaciones de alto voltaje y frecuencia. (Rashid, 1995)

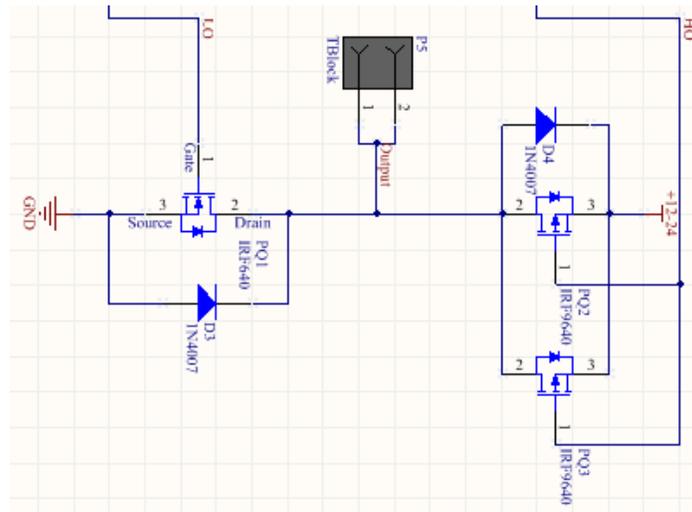


Figura 24: Diagrama eléctrico de medio puente H.

2.3.7. Motor de CD

Los motores de CD son máquinas eléctricas capaces de convertir energía eléctrica de CD en energía mecánica, lo anterior se logra por medio de un dispositivo electromecánico capaz de convertir los voltajes internos de CA en un voltaje constante de CD en las dos terminales del motor, a este dispositivo se le conoce como maquinaria de conmutación o conmutador. Debido a su fácil control, los motores de CD son comúnmente usados en aplicaciones de baja potencia tales como juguetes, impresoras, mecanismos dentro de los automóviles entre otros. En el sector industrial y aplicaciones de alta potencia, los motores de CD han sido remplazados por motores más eficientes y duraderos como lo son los motores trifásicos de CA. (Chapman, 2012)

2.3.8. Motor BLDC

Un motor sin escobillas de corriente directa (BLDC del inglés: *Brush Less Direct Current*) es una versión del motor de CD que elimina la maquinaria de conmutación. De acuerdo con (Jian, Kun, & Qing, 2018) estos motores poseen ventajas sobre sus versiones de CD tales como mayor confiabilidad, mejor control, mayores velocidades máximas, alto tiempo de vida, mayor eficiencia y densidad de potencia en comparación con sus contrapartes de CD con escobillas. Estas

ventajas en conjunto con el hecho de que los motores sin escobillas no producen la chispa de los motores de CD con escobillas (debido a que no requieren de un conmutador mecánico) le permiten al motor BLDC utilizarse en aplicaciones tales como aviación, discos duros, motores de fresadoras, sistemas solares y compresores de alta velocidad (Qian & Ming, 2017; Chunyuan, Xiaoxia, & Guannan, 2018). La conmutación de un motor BLDC se logra mediante un dispositivo electrónico comúnmente conocido como controlador de velocidad electrónico (ESC). Debido a la arquitectura de los motores BLDC, un ESC requiere información de la posición del rotor para realizar una conmutación confiable, tradicionalmente esto se ha logrado por medio de sensores de efecto Hall o sensores ópticos integrados en la instalación del motor. Las últimas dos décadas han ofrecido una variedad de soluciones libres de estos sensores frágiles y costosos para determinar la posición del rotor en motores BLDC tales como la estimación de flujo, la medición del voltaje de la fuerza contra-electro-motriz entre otros (Chen, Liu, & Zhu, 2017).

2.3.9. Microcontrolador

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico que cuenta con un microprocesador, una cantidad fija de memoria de acceso aleatorio (RAM del inglés: *Random Access Memory*), memoria de sólo lectura (ROM del inglés: *Read Only Memory*), puertos de entrada / salida (I/O del inglés: *In / Out*), temporizadores, puertos de comunicación y cualquier otro dispositivo periférico dentro adicional de un chip integrado. A diferencia de un microprocesador de propósito general, un microcontrolador tiene todos los dispositivos periféricos necesarios para interactuar con otros electrónicos de manera independiente. La cantidad fija de memoria RAM, ROM y puertos I/O hacen a los microcontroladores ideales para aplicaciones en las cuales el costo y espacio disponible son críticos como son los sistemas embebidos. Algunas de las aplicaciones de los microcontroladores incluyen teléfonos, copiadoras, sistemas de seguridad, microondas, juguetes, controlador de motores automotrices, controlador de bolsas de aire, control de transmisiones automáticas, control de aires acondicionados entre otros. (Ali Mazidi, McKinlay, & Causey, 2008)

2.3.10. Diseño

Es un proceso que formula un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. Cuando el plan concluye con la creación de algo físico, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil y que pueda fabricarse y comercializarse. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

El diseño es un proceso innovador, y altamente iterativo que involucra la toma de decisiones basada en la información disponible que requiere una actividad intensa de comunicación visual, oral y escrita. Los diseñadores deben comunicarse de forma eficaz y trabajar con gente de muchas disciplinas, esta comunicación es vital para el éxito de un diseño. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

El proceso de diseño comienza con la identificación de una necesidad y la decisión de hacer algo al respecto seguido de un proceso iterativo que concluye con la presentación (oral, visual o escrita) de una solución al problema en cuestión. El siguiente paso consiste en la ejecución de la solución propuesta cuyos pasos depende de la naturaleza del diseño. La figura 22 muestra las fases de un proceso de diseño reconociendo múltiples retroalimentaciones e iteraciones. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

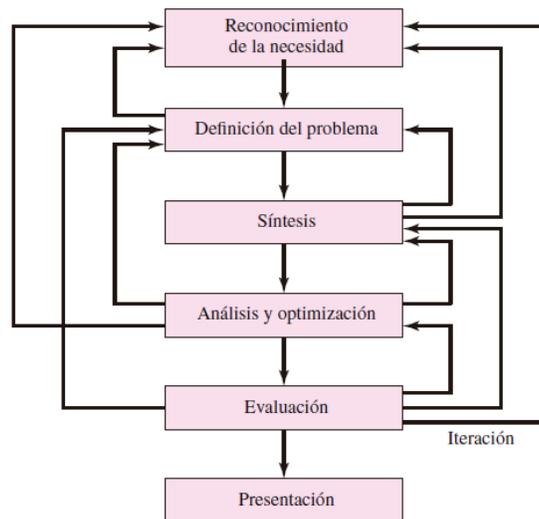


Figura 25: Proceso de diseño. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.1. Dimensiones y tolerancias

Son los valores que definen la geometría de una pieza. Por lo general para dimensionar se emplean los siguientes términos:

Tamaño nominal: Es el tamaño **teórico** usado para designar la dimensión un elemento.

Límites: Son las dimensiones máximas y mínimas establecidas que tendrá una pieza al ser fabricada. Normalmente los límites se muestran al lado del tamaño

nominal como sub – índice para el límite mínimo y súper – índice para el límite máximo.

Tolerancia: Es la diferencia entre el límite superior e inferior.

Holgura: Término general que se refiere al acoplamiento de partes cilíndricas como un perno y un agujero. La palabra “holgura” sólo se emplea cuando el diámetro del elemento interno es menor que el del elemento externo. La holgura diametral es la diferencia medida en los dos diámetros. La holgura radial es la diferencia entre los dos radios. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.2. Normas

Son un conjunto de especificaciones para partes, materiales, software u otros procesos establecidos con el fin de lograr uniformidad, eficiencia y cantidad especificada. Uno de los propósitos importantes de las normas es limitar el número de artículos para lograr un inventario razonable, de herramientas, tamaños, formas y variedades. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.1. Resistencia mecánica

Es una propiedad de un material o elemento mecánico que depende de la elección, el tratamiento y el procesamiento del material. La resistencia de una pieza es una propiedad inherente del material ya que no depende de elementos externos, sino que está integrada en el material y procesos empleados en su construcción. Existen varios procesos que afectan la resistencia de los materiales tales como el tratamiento térmico, forjado, laminado y formado en frío. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

En este trabajo se usará el símbolo S para denotar la resistencia con un subíndice apropiado para denotar la clase de resistencia tratada. De este modo: S_s será la resistencia a la fuerza cortante, S_y será la resistencia a la fluencia y S_u será la resistencia última.

2.3.1. Esfuerzo mecánico

Es un fenómeno producido al someter un cuerpo sólido a un sistema de fuerzas exteriores (cargas aplicadas y reacciones) en equilibrio. Dependiendo de la dirección y magnitud de estas fuerzas aplicadas a un área determinada por la geometría del cuerpo sólido es como se produce un esfuerzo o tensión mecánica. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2003)

Es una propiedad de estado en un punto específico dentro de un cuerpo que es una función de la carga, la geometría, la temperatura y el proceso de manufactura empleado. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

Dentro del Sistema Internacional (SI) de unidades de medida, el esfuerzo se mide utilizando la unidad del Pascal (Pa), que equivale al esfuerzo producido por una fuerza de un Newton (N) aplicada sobre una superficie de un metro cuadrado m^2 . (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2003)

De acuerdo con la práctica aceptada, se utilizará la letra griega σ (sigma) y τ (tau) para designar los esfuerzos normales y cortantes respectivamente, utilizando subíndices para designar la dirección de los esfuerzos.

2.3.1. Deformación

Considerando un cuerpo sólido cualquiera sometido a la acción de un sistema de fuerzas aplicadas y que este cuenta con al menos un vínculo a un cuerpo fijo. Dado que no existe ningún material con una rigidez infinita, la acción de las fuerzas se traduce a que el cuerpo se deforma. Si el cuerpo sigue el principio de rigidez, estas deformaciones serán pequeñas comparadas con la dimensiones del cuerpo. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2003)

2.3.1. Rigidez

Es la resistencia de un material a la deformación al ser sometida a un sistema de cargas externas. (Cervera Ruiz & Blanco Díaz, 2003)

2.3.2. Dureza

Es la resistencia de un material a la penetración por una herramienta con punta se llama dureza. Las unidades de medida más comunes para la dureza son la dureza Rockwell y la dureza Brinell. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.1. Cargas mecánicas

Son una fuerza externa aplicada a una estructura o una parte, se conoce como carga de impacto si el tiempo de aplicación es menor de un tercio del periodo natural de vibración mínimo. Para cargas de mayor duración se le conoce como cargas estáticas, cuya unidad de medida en el SI se conoce como Newton (N). En

la industria, la resistencia al impacto se demuestra a través de la prueba de barras con muesca de Charpy o Izod. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.1. Efecto de la temperatura en piezas mecánicas

La resistencia y la ductilidad, o la fragilidad, se ven afectadas por el efecto de la temperatura del entorno de operación. La deformación bajo carga continua y variaciones de temperatura se llama **termo-fluencia**. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.1. Aluminio

Es un material no ferroso cuyas aleaciones cuentan con propiedades sobresalientes, principalmente su relación resistencia – peso, su resistencia a la corrosión y su alta conductividad eléctrica y térmica. La densidad de este metal es aproximadamente $2770 \frac{kg}{m^3}$ comparado con los $7750 \frac{kg}{m^3}$ del acero. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

El aluminio cuenta con una resistencia a la tensión de aproximadamente $90 MPa$ en su forma pura, este valor puede mejorarse considerablemente con la adición de otros materiales de aleación y procesos de trabajo en frío. El módulo de elasticidad del aluminio es de $71.7 GPa$, otorgando a este material una rigidez de aproximadamente un tercio a la del acero. El costo y la resistencia del aluminio y sus aleaciones lo colocan entre los materiales más versátiles desde el punto de vista de la fabricación. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

2.3.1. Sistema de suspensión vehicular

Es un conjunto de elementos que conectan el cuerpo de un vehículo a sus ruedas mientras que soporta el peso de este, permitiendo el movimiento relativo entre las ruedas y el cuerpo del vehículo. En teoría, un sistema de suspensión debe reducir la cantidad de grados de libertad de una rueda de 6 a 2 en la suspensión trasera y a 3 en la suspensión delantera incluso cuando esta debe soportar las fuerzas de la aceleración, el frenado, la dirección y sus fuerzas asociadas. Las direcciones de movimiento que debe permitir un sistema de suspensión a las ruedas es el movimiento vertical, rotacional y de dirección relativo al cuerpo del vehículo.

Una suspensión está conformada por uno o varios brazos que conectan la rueda con el cuerpo del vehículo, estas transfieren todas las fuerzas y momentos en diferentes direcciones entre el suelo y el cuerpo del vehículo. Otro elemento vital son los resortes, estos soportan el vehículo y hacen las vibraciones tolerables para los pasajeros. Después se encuentran los amortiguadores, dispositivos mecánicos o hidráulicos que disipan los impulsos producidos por el movimiento del vehículo.

Finalmente se encuentran los cojinetes, usados para prevenir el contacto directo entre dos metales para aislar el ruido y reducir las vibraciones. Los cojinetes están hechos en la mayoría de los casos de hule y son usados en varias partes móviles del vehículo.

2.3.2. Resorte

Es un objeto elástico usado para convertir energía cinética en energía potencial y vice-versa. Los resortes son un componente importante en los sistemas de suspensión dado que soporta las fuerzas normales que son cruciales para la maniobrabilidad y calidad de manejo de un vehículo. A lo largo de la historia se han creado varios tipos de resortes con el objetivo de mejorar el desempeño de los sistemas de suspensión. (Goodarzi & Khajepour, 2017)

2.3.2.1. Resorte helicoidal

Con sus primeras apariciones en el siglo XV, los resortes helicoidales se conforman de un material elástico formado en una hélice. El resorte tradicional obedece la ley de Hooke y tiene un coeficiente de resorte constante; por otro lado, los vehículos modernos comúnmente utilizan resortes de coeficiente variable para proporcionar un manejo suave cuando se viaja con cargas ligeras y un manejo más rígido cuando se conduce con cargas más grandes. La figura 26 muestra algunos tipos de resorte helicoidal utilizados comúnmente. (Goodarzi & Khajepour, 2017)

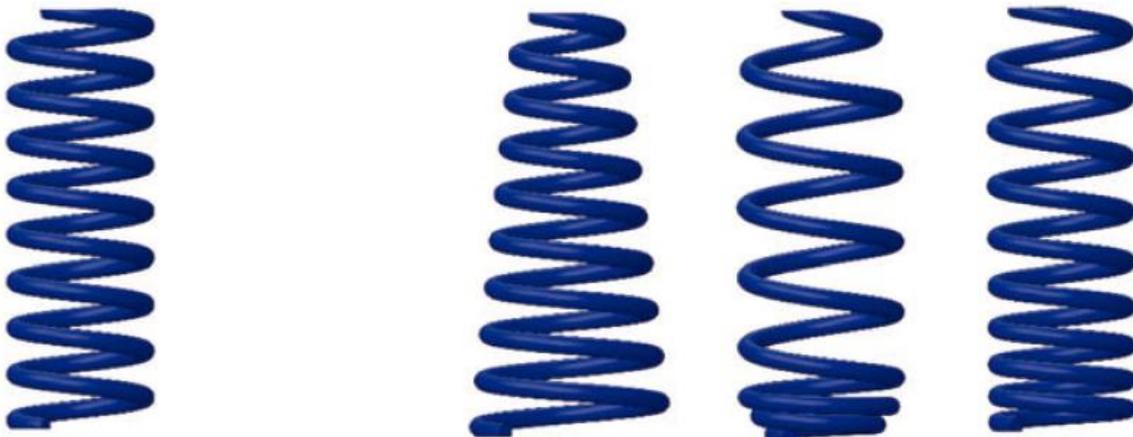


Figura 26: Resorte helicoidal de coeficiente constante (izquierda) y resortes de coeficiente variable (derecha). (Goodarzi & Khajepour, 2017)

2.3.2.2. Barras de torsión

Es un resorte torsional, usado como resorte principal en los sistemas de suspensión. Está construido de una barra larga dónde un extremo está conectado al chasis del vehículo y el otro a un brazo de control. Como se observa en la figura 27, el movimiento vertical de la rueda resulta en la rotación de la barra a lo largo de su eje, este movimiento es resistido por la rigidez torsional de la barra generando así el efecto de resorte. Las suspensiones con resortes de barra de torsión se usan principalmente en vehículos compactos europeos en la parte trasera y por algunos vehículos utilitarios deportivos (SUB) y camiones los usan en su parte delantera. (Goodarzi & Khajepour, 2017)

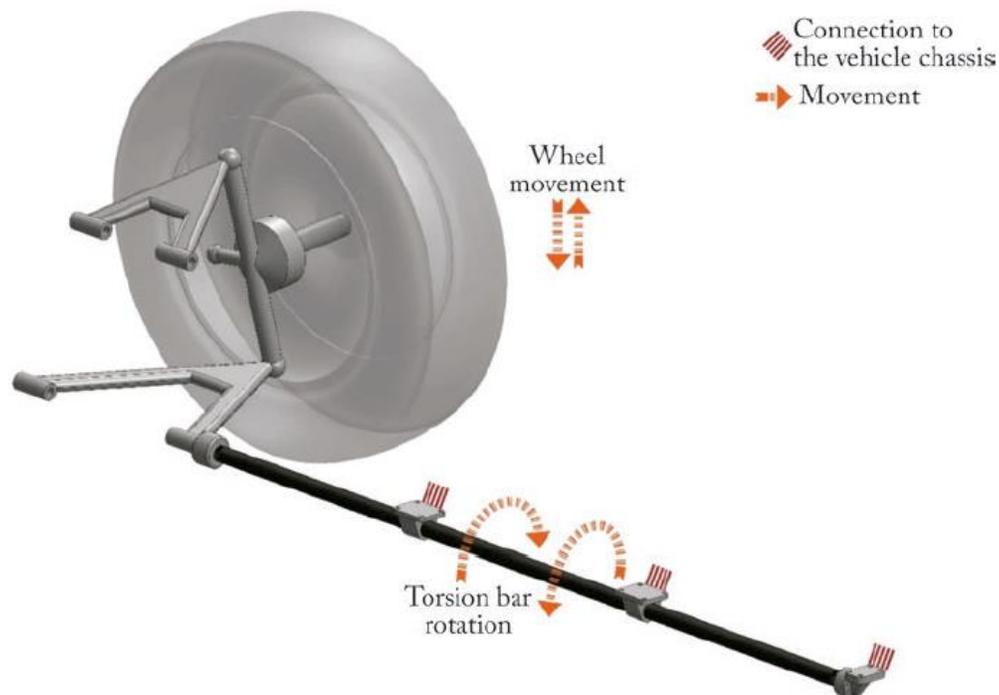


Figura 27: Principio de funcionamiento de la suspensión por barras de torsión. (Goodarzi & Khajepour, 2017)

2.3.2.3. Muelles

Los muelles o resortes de hoja consisten de barras longitudinales con forma de arco como se muestra en la figura 28, dónde el centro del arco está soportado por el eje del vehículo, usualmente un extremo del muelle está conectado directamente al chasis del vehículo y el otro está conectado a este por medio de un eslabón. Los muelles se utilizan en las suspensiones de eje sólido, que aparecen principalmente en camionetas. (Goodarzi & Khajepour, 2017)



Figura 28: Muelle. (Goodarzi & Khajepour, 2017)

2.3.3. PIC18F26K40

Es un microcontrolador que combina grandes cantidades de memoria Flash (64 KB), EEPPROM (1024 Bytes) y RAM (3728 Bytes), bajo consumo energético y soporte para voltajes de 2.3 a 5V que le permite utilizarse en una gran variedad de aplicaciones de propósito general. (Microchip Technology Inc., 2019)

El dispositivo viene equipado con varios periféricos independientes al procesador, de los cuales destacan el Convertidor Analógico Digital (ADC), el módulo de Captura, Comparación y PWM (CCP) varios puertos de comunicación incluidos el Receptor-Transmisor Asíncrono Universal (UART), la Interfaz Serial Periférica (SPI) y el Circuito Inter-Integrado (I2C). Para las tareas de medición de tiempo y conteo se cuenta con varios contadores de 8 y 16 bits, 4 y 3 respectivamente. La figura 26 muestra el dispositivo en su configuración Doble en Línea (DIP) (Microchip Technology Inc., 2019)



Figura 29: PIC18F26K40. (Microchip Technology Inc., 2019)

El PIC18F26K40 es capaz de soportar temperaturas de rango industrial que va desde los -40 hasta los 85 grados centígrados (°C). (Microchip Technology Inc., 2019)

2.3.1. Raspberry Pi 3 Modelo B+

Es el último producto de la línea de ordenadores de placa reducida (SBC), estando equipada con un procesador de 64 bits operando a una frecuencia de 1.4 GHz así como un arreglo de dispositivos de conectividad inalámbrica incluyendo Wi-Fi y Bluetooth en varias frecuencias. La figura 26 muestra la vista superior de la Raspberry Pi 3 Modelo B+ (Raspberry Pi Foundation, 2019)



Figura 30: Raspberry Pi 3 Modelo B+. (Raspberry Pi Foundation, 2019)

La Raspberry Pi 3 Modelo B+ mantiene las mismas dimensiones físicas que sus predecesores la Raspberry Pi 3 la Raspberry Pi 2 Modelo, mientras que esta trae mejoras de velocidad, conectividad y versatilidad en comparación con sus predecesores. (Raspberry Pi Foundation, 2019)

2.3.2. Raspbian

Es el sistema operativo gratuito basado en el sistema operativo Debian, optimizado para utilizarse en el hardware de la Raspberry Pi. Es un proyecto comunitario en desarrollo continuo, con un enfoque en mejorar la estabilidad y el desempeño de tantos paquetes de Debian como sea posible. (Raspberry Pi Foundation, 2019)

3. Metodología empleada

El presente capítulo describe la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto de tesis.

3.1. Tipo de investigación

La investigación aplicada en este trabajo de tesis es de ámbito adaptativo, definido por (Food and Agriculture Organization, 2017) como aquella que involucra la adaptación de tecnologías conocidas y probadas previamente.

La investigación adaptativa es particularmente importante en sistemas que involucran cosechas, en donde los beneficiarios finales (agricultores) se involucran en la planeación e implementación de la investigación.

3.2. Investigación documental preliminar

La investigación inició con una revisión exhaustiva de fuentes de información conformada por artículos científicos sobre plataformas robóticas aplicadas en agricultura de precisión, enfocándose en las investigaciones que desarrollaban UGV y/o UAV para realizar tareas agrícolas tales como la siembra, cosecha y aplicación de agroquímicos. Además se investigaron temas relacionados con la operación de las plataformas robóticas utilizadas como lo es el control de motores eléctricos del tipo BLDC y las comunicaciones inalámbricas tales como el protocolo Wi-Fi, GPS y GPRS.

También se consultó con personas expertas en los temas relacionados con la investigación, entre ellos profesores pertenecientes al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Colima.

3.3. Descripción de la metodología

Terminada la investigación preliminar, se realizó una propuesta referente al diseño y construcción del vehículo autónomo. La implementación del vehículo autónomo basado en GPS para la aplicación de agroquímicos en plantas ornamentales se dividió en fases mostradas en la tabla 1.

3.3.1. Cronograma de actividades

| Cronograma de actividades | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales | | | | | | | | | | | | | |
| Actividades a realizar | | Periodo: del 21 de Agosto del 2018 al 31 de Junio del 2019 | | | | | | | | | | | |
| | | Tiempo de desarrollo (Semanas) | | | | | | | | | | | |
| Número | Descripción | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 |
| 1 | Análisis de requerimientos del proyecto | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Diseño del vehículo autónomo | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Construcción del prototipo del vehículo autónomo | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Programación de controladores del vehículo autónomo | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Desarrollo de la interfaz de control remoto del vehículo autónomo | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Desarrollo de las rutinas de control autónomo | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Pruebas finales y liberación del proyecto | | | | | | | | | | | | |

Tabla 1: Cronograma de actividades.

3.3.2. Descripción de los procedimientos

En la tabla 2 se describen las actividades necesarias para realizar el proyecto de tesis.

Tabla 2: Tabla de actividades para el proyecto de tesis.

| Descripción de actividades | | |
|---|---|--|
| Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales | | |
| Actividad | Descripción | Tareas |
| <i>Análisis de requerimientos del proyecto</i> | Determinar los requerimientos que debe cumplir el vehículo autónomo, para así poder tomar las decisiones de diseño que cumplan con dichos requerimientos. | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar visitas de inspección en los viveros en dónde se realizará el proyecto. • Realizar entrevistas con los dueños de los viveros, así como con los operadores finales del vehículo autónomo, sobre los requerimientos que el vehículo autónomo debe cumplir. |
| <i>Diseño del vehículo autónomo</i> | Fase de diseño del vehículo autónomo | <ul style="list-style-type: none"> • El diseño mecánico del vehículo autónomo • Selección de los componentes electromecánicos y electrónicos del vehículo autónomo. Tales como: <ul style="list-style-type: none"> ○ Los motores a utilizar para el movimiento del vehículo autónomo ○ Los actuadores adicionales que se requieren para el cumplimiento de los requerimientos del proyecto. ○ Los sensores necesarios para la operación del vehículo autónomo ○ Las fuentes de energía del vehículo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Baterías |
| <i>Construcción del prototipo del vehículo autónomo</i> | Considerando que ya se terminó la fase de diseño del vehículo autónomo, consiste en la construcción del prototipo de dicho vehículo | <ul style="list-style-type: none"> • Construcción de la estructura • Instalación de motores y actuadores • Instalación de elementos electrónicos <ul style="list-style-type: none"> ○ Sensores ○ Controladores |

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

| | | |
|---|--|---|
| <p><i>Programación de controladores del vehículo autónomo</i></p> | <p>Esta actividad consiste en la programación de los controladores para las diferentes funciones del vehículo, De tal forma que todos sus componentes mecánicos puedan ser controlados por estos.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Diseño de controladores <ul style="list-style-type: none"> ○ Selección de componentes • Elaboración • Programación |
| <p><i>Desarrollo de la interfaz de control remoto del vehículo autónomo</i></p> | <p>Desarrollo de la interfaz para controlar el vehículo autónomo de manera remota, por medio de la transmisión de datos de diferentes sensores</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Sensores <ul style="list-style-type: none"> ○ Distancia ○ Temperatura ○ Humedad |
| <p><i>Desarrollo de las rutinas de control autónomo</i></p> | <p>Desarrollo de rutinas de control autónomo, las cuales se interconectan con la interfaz previamente desarrollada en la Actividad 5, con el objetivo de permitir la operación del vehículo autónomo sin la necesidad de que este sea controlado por un operador todo el tiempo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de algoritmos de trabajo autónomo. • Implementación del sistema de rutinas autónomas a la interfaz (creada en la Actividad 5). • Pruebas de funcionamiento para el seguimiento autónomo de rutas |
| <p><i>Pruebas finales y liberación del proyecto</i></p> | <p>La última actividad del proyecto, consistiendo de una serie de pruebas del vehículo, corrección de errores, así como su implementación final en el vivero.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Pruebas de integración para la operación de todos los módulos del vehículo. • Elaboración de la documentación de apoyo para la operación del vehículo. |

4. Desarrollo

4.1. Análisis de requerimientos

Para el desarrollo del UGV agrícola propuesto en esta investigación es necesario obtener los requerimientos iniciales proporcionados por el productor, las características del cultivo a trabajar así como las condiciones del terreno en dónde se implementará. La información recabada del productor referente a los requerimientos del UGV agrícola se muestra en la tabla 3.

| Requerimientos del productor | |
|---|----------------------|
| Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales | |
| Nombre | Valor |
| Capacidad de carga de agroquímico | 100 Litros |
| Distancia entre surcos | 2 metros |
| Ancho de surco | 1 metro |
| Planta ornamental a trabajar | Palma de piso |
| Terreno de implementación | Terracería irregular |

Tabla 3: Requerimientos del productor para el UGV agrícola.

4.2. Descripción del sistema a desarrollar

El Vehículo Híbrido Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales está conformado por un UGV agrícola controlado remotamente por medio de una conexión de red WiFi. Esta conexión será establecida entre el operador en una estación de control dentro de las instalaciones de ORNACOL y el módulo de cómputo consistido por una computadora de una sola tarjeta (SBC del inglés: *Single Board Computer*) Raspberry Pi 3 modelo B la cual recibe las instrucciones del operador y las transmite a los módulos de control del UGV agrícola: un módulo controlador de los motores de tracción y un módulo controlador de los sistemas de aplicación de agroquímicos.

4.3. Diseño mecánico y estructural

El diseño general del UGV agrícola se basó en el VPK-7829 Bumerang, un transporte de personal blindado (APC del inglés: *Armored Personnel Carrier*) debido a su geometría simple y amplia disponibilidad de superficies planas que facilitan la instalación de los dispositivos necesarios para desempeñar las tareas agrícolas requeridas.

4.3.1. Dimensiones exteriores

Las dimensiones exteriores del UGV agrícola mostradas en la tabla 4 se eligieron tomando en cuenta el análisis de requerimientos de la sección 4.1. También se consideró el espacio requerido por los componentes mencionados en la sección 4.2.

| Dimensiones exteriores | |
|--|------------------------|
| Vehículo Autónomo Terrestre Basado en GPS para la Aplicación de Agroquímicos en Plantas Ornamentales | |
| Longitudes | |
| Nombre | Longitud en milímetros |
| Ancho inferior | 400 |
| Longitud inferior | 866 |
| Ancho central | 600 |
| Longitud central | 1000 |
| Ancho superior | 600 |
| Longitud superior | 783 |
| Ángulos | |
| Nombre | Ángulo en grados |
| Ángulo entre la parte inferior y la vertical | 60 |
| Ángulo entre la parte superior y la vertical | 30 |

Tabla 4: Dimensiones exteriores para el UGV agrícola.

4.3.2. Diseño del chasis

El chasis del UGV agrícola está construido con perfiles de aluminio cuadrado de 1.25 pulgadas de longitud por lado y un grosor de 0.125 pulgadas. El diseño utilizado se muestra en la figura 22.



Figura 31: Chasis diseñado para el EGV agrícola.

4.3.3. Sistema de suspensión

4.3.3.1. Descripción de funcionamiento

Las cuatro ruedas del UGV agrícola cuentan con una suspensión independiente del tipo McPherson con barra de torsión cuadrada de acero estructural de $\frac{1}{4}$ " (6.35 mm). Esta barra está conectada a un brazo de control que a su vez está conectado al ensamblaje de masa - rueda.

La figura 32 muestra los componentes de la suspensión montados en el chasis del UGV agrícola, en donde se observan dos componentes distintos: El primero consiste de un soporte estático colocado en el centro del UGV agrícola encargado de mantener la barra de torsión estática con respecto a la posición del chasis. El segundo componente es un soporte libre, que permite la rotación de la barra de torsión a los extremos del chasis, mientras que no permite que esta se flexione ya que se encuentra fijo al chasis. Lo anterior se logró por medio de la inserción de un rodamiento de rotillos tipo HK1212 (12 mm de diámetro interno por 12 mm de longitud) dentro de los soportes libres al cual se le colocó un inserto cilíndrico con un diámetro exterior de 12 mm con un orificio cuadrado de dimensiones compatibles con la barra de torsión permitiendo así una conexión libre de interferencia entre el rodamiento y la barra de torsión.



Figura 32: Soportes móviles (gris oscuro) y fijos (blanco) para la barra de torsión.

4.3.3.1. *Diseño de la barra de torsión*

El sistema de suspensión cuenta con un resorte torsional o barra de torsión que hace uso de la deformación angular flexible resultado de la aplicación de un par de torsión T a un sólido. En 1855 Saint Venant demostró que el esfuerzo cortante máximo τ_{max} para una sección transversal rectangular ocurre en el punto central del lado mayor y está definido por la ecuación 1. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

$$\tau_{max} = \frac{T}{\alpha bc^3} = \frac{T}{bc^2} \left(3 + \frac{1.8}{b/c} \right) \quad (1)$$

Dónde b y c son la longitud de los lados, α es un valor función de la relación b/c como se observa en la tabla 5.

Tabla 5: Valores de α y β para una sección transversal rectangular. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

| b/c | 1.00 | 1.50 | 1.75 | 2.00 | 2.50 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 8.00 | 10 | ∞ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| α | 0.208 | 0.231 | 0.239 | 0.246 | 0.258 | 0.267 | 0.282 | 0.299 | 0.307 | 0.313 | 0.333 |
| β | 0.141 | 0.196 | 0.214 | 0.228 | 0.249 | 0.263 | 0.281 | 0.299 | 0.307 | 0.313 | 0.333 |

La magnitud de la deformación angular de una barra de sección transversal cuadrada está dada por la ecuación 2 (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008).

$$\theta = \frac{Tl}{\beta bc^3 G} \quad (2)$$

Dónde G es el módulo de elasticidad al corte o módulo de rigidez y β es un valor función de la relación b/c mostrado en la tabla 5.

Considerando los parámetros iniciales de diseño, el sistema de suspensión debe de soportar una carga de 100 Kg, considerando una distribución equitativa en las cuatro ruedas de 25 Kg por rueda, los datos necesarios para calcular el ángulo de giro resultante del par aplicado a las barras torsión se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Parámetros para el cálculo de deformación angular.

| Sistema de suspensión | |
|--|--------------|
| Cálculo de deflexión angular | |
| Parámetro | Valor |
| Longitud brazo de palanca (L) | 0.148 m |
| Longitud de lado sección transversal (b y c) | 0.00635 m |
| Carga Axial (F) | 245.25 N |
| Módulo de elasticidad del acero al carbono (G) | 79.3 GPa |

Dada la carga aplicada, el par de torsión T aplicado en la barra de torsión se da por la ecuación 3.

$$T = FL \quad (3)$$

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

Dónde F es la fuerza aplicada en Newtons (N) y l es la longitud en metros. Sustituyendo los valores de la tabla 6 se tiene que:

$$T = (245.25)(0.1485) = 36.41 \text{ Nm}$$

Calculando el resultado se obtiene que el par máximo aplicado a cada rueda será de 36.41 Newton Metro (Nm). Considerando que la barra utilizada es de sección transversal cuadrada ($b/c = 1$), la tabla 5 indica que el valor de β será de 0.141. Para calcular la deflexión angular se utiliza la ecuación 2.

$$\theta = \frac{Tl}{\beta bc^3 G}$$

Sustituyendo los valores con los de la tabla 6.

$$\theta = \frac{(36.41)l}{(0.141)(0.00635)(0.00635)^3(79.3)10^9}$$

Despejando los valores.

$$\theta = \frac{(36.41)l}{(0.141)(0.00635)^4(79.3)10^9} = \frac{(36.41)l}{18.1797} =$$

Finalmente se obtiene la ecuación 4

$$\theta = (2.0027)l \tag{4}$$

Dónde l es la longitud de la barra de torsión en metros y θ es la deflexión angular en radianes. Considerando que un radian es igual a $180/\pi$, la ecuación 4 se expresa en grados sexagesimales a través de la ecuación 5.

$$\theta = (114.7510)l \quad (5)$$

Considerando que la deflexión máxima aceptable para el sistema de suspensión es de 15° , despejando θ en la ecuación 5 se tiene la ecuación 6.

$$l = \frac{\theta}{114.7510} \quad (6)$$

Sustituyendo valores en la ecuación 6 se tiene que la longitud ideal para la barra de torsión es de **0.1371 m** o alrededor de **14 centímetros (cm)**.

$$l = \frac{15}{114.7510} = 0.1371 \text{ m} \approx 14 \text{ cm}$$

El resultado anterior representa la distancia entre el ensamblaje masa – rueda y el soporte fijo más cercano, estos soportes se deslizarán en el chasis para igualar la distancia de la barra de torsión a este resultado

4.3.4. Ensamblaje de masa – rueda

El ensamblaje masa – rueda es un conjunto de elementos cuyo propósito es el de crear una conexión mecánica entre el terreno y el chasis del vehículo mientras que al mismo tiempo permiten la transferencia de potencia proveniente del tren motriz del UGV agrícola. La figura 33 muestra el ensamblaje masa – rueda con todos sus componentes.

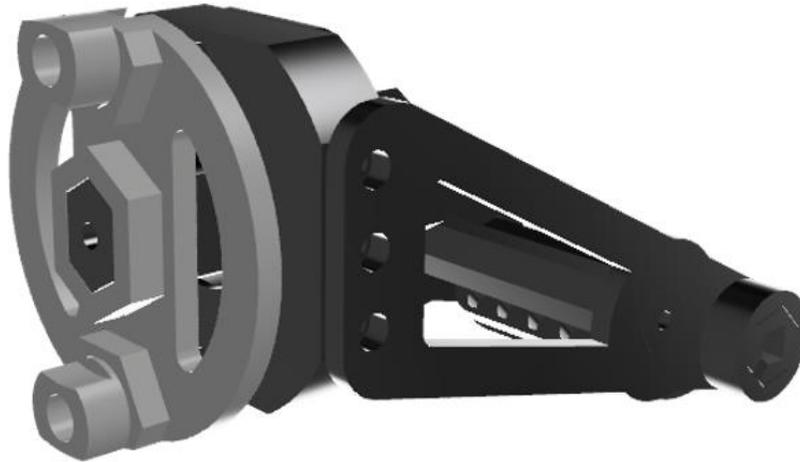


Figura 33: Ensamblaje masa - rueda.

4.3.4.1. Descripción de funcionamiento

La figura 34 muestra una de las cuatro ruedas utilizadas en el UGV agrícola, que consisten de hule sólido de 9 pulgadas de diámetro. Cada una de las ruedas está montada en el ensamblaje de masa – rueda por medio de dos tornillos de 0.375 pulgadas de diámetro.



Figura 34: Rueda de 9 pulgadas utilizada en el UGV agrícola.

El siguiente elemento del ensamblaje masa – rueda se denomina como **estator**, una pieza porta – rodamientos, en dónde se insertó un cojinete de bolas modelo 6103 cuyas dimensiones son; 17 mm de diámetro interior, 42 mm de diámetro exterior y 14 mm de grosor con propósito de soportar las cargas radiales generadas por el peso y movimiento del vehículo. La figura 35 muestra la vista trasera del estator.

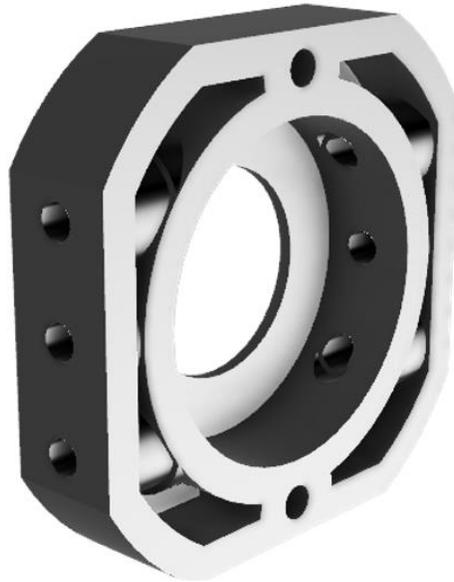


Figura 35: Estator, componente en el ensamblaje masa - rueda.

La siguiente pieza del ensamblaje se denomina **rotor**, cuyo propósito es el de conectar la rueda del UGV agrícola con los demás elementos del ensamblaje masa-rueda. Este cuenta con un orificio en el centro hexagonal para insertar la flecha así como dos orificios para hexagonales en los extremos que coinciden con aquellos presentes en la rueda, de este modo permitiendo pasar un tornillo a través de ambos para quedar unidos como una sólo. La figura 36 muestra el rotor del UGV agrícola.

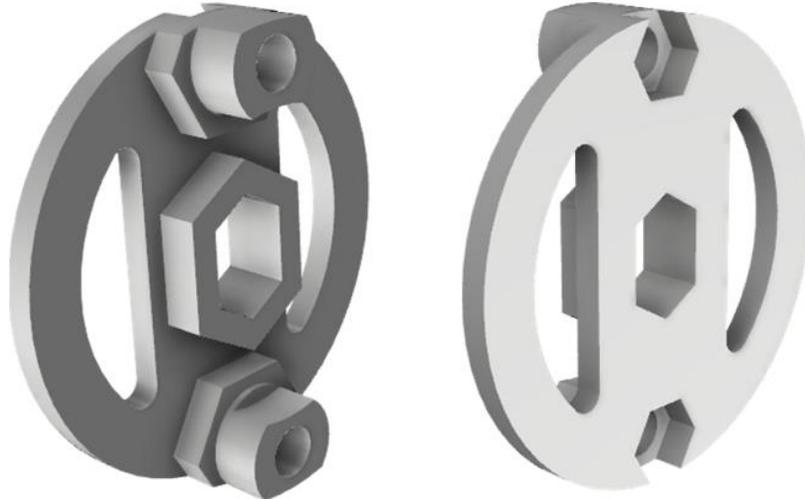


Figura 36: Parte frontal y trasera del rotor.

En la figura 37 se observa la **flecha**, el siguiente elemento del ensamblaje masa – rueda, esta es una pieza diseñada para soportar pares de torsión y transferirlos a otros elementos del tren motriz. El diámetro mínimo de la flecha es de 17 mm para hacerla compatible con el rodamiento 6303. Los extremos de la flecha tienen un acabado hexagonal así como orificios colocados estratégicamente para generar una conexión rígida entre el rotor y el cople para la junta universal, permitiendo que este conjunto de elementos gire libremente en el eje del rodamiento montado en el estator.

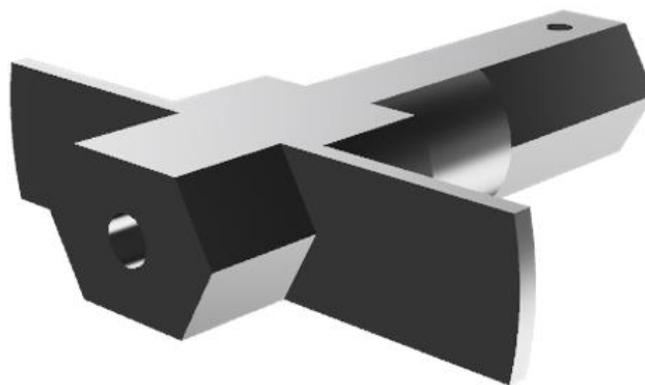


Figura 37: Flecha del ensamblaje masa – rueda.

El último elemento importante del ensamblaje masa – rueda es el **acoplamiento para la junta universal**, una pieza usada únicamente como interfaz entre la flecha

y la junta universal usada para transferir potencia proveniente de los motores a las ruedas del UGV agrícola. Esta cuenta con orificios circulares y hexagonales así como orificios laterales para crear la conexión fija requerida. Además, el acoplamiento y la flecha están diseñados de manera tal que permiten colocar un rodamiento axial 51105 en cada extremo del estator con motivo de soportar las cargas axiales. La figura 38 muestra el acoplamiento para la junta universal.

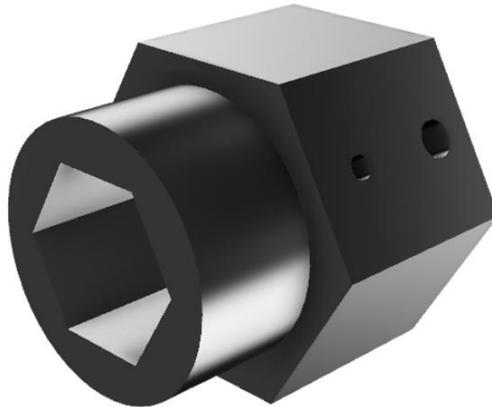


Figura 38: Acoplamiento para la junta universal.

4.3.4.2. Cálculo de cargas del rodamiento

Considerando una masa $m = 25 \text{ kg}$ por rueda, la fuerza F resultante en cada rueda se determina por la ecuación 7.

$$F = ma \quad (7)$$

Dónde a es la aceleración de la masa m . Sustituyendo los valores y usando una aceleración $a = 9.81 \text{ m/s}^2$ que corresponde con la generada por la atracción gravitacional de la tierra, se tiene que.

$$F = (25)(9.81) = 245.25 \text{ N}$$

Considerando que el rodamiento 6303 tiene un valor de carga estática máxima $C_0 = 6.55 \text{ kN}$ (SKF Group, 2019) el factor de seguridad n_f está definido por la ecuación 8.

$$n_f = \frac{C_0}{F} \quad (8)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 8 se tiene que $n_f =$ que es mucho mayor que la unidad que indica que el rodamiento es más que capaz de soportar la carga estática producida por una masa $m = 25 \text{ kg}$.

$$n_f = \frac{6550}{245.25} = 26.7 \gg 1$$

4.3.5. Ensamblaje motor – reductor

Con el propósito de facilitar el movimiento bajo carga, el UGV Agrícola cuenta con un ensamblaje motor- reductor que permite la transmisión de potencia entre el motor BLDC8318 y un tren de engranes planetarios. La figura 39 muestra el ensamblaje motor-reductor desde el exterior.



Figura 39: Exterior del ensamblaje motor-reductor.

4.3.5.1. *Calculo de factor de velocidad*

El ensamblaje motor-reductor está conformado por un tren de engranes planetarios de dos fases idénticas. La relación de transmisión r_t está dada por la ecuación 9 (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008).

$$r_t = \frac{N_{sol}}{N_{sol} + N_{corona}} \quad (8)$$

Para crear tren de engranes con la mínima relación de velocidad r_t , el engrane corona se mantiene estático mientras que la entrada de potencia proviene del engrane sol y la salida se obtiene de los engranes planetas que hacen girar la estructura conocida como porta-planetas.

En la ecuación 8 la cantidad de dientes en el engrane central o sol N_{sol} se divide por la suma entre los dientes en el engrane exterior o corona N_{corona} para obtener la relación de velocidad resultante.



Figura 40: Porta-Planetas del ensamblaje motor-reductor.

Para asegurar que los planetas en el engranaje planetario puedan colocarse con un espaciado uniforme sin que haya interferencia es necesario que $N_{sol} + N_{corona}$ sea divisible entre la cantidad de planetas montados en el porta-planetas. La figura 40 muestra el porta-planetas utilizado en el ensamblaje motor-reductor, dónde se

observa que existen 4 planetas montados en el porta-planetas, desfasados uniformemente a 90 grados de cada uno.

Tabla 7: Parámetros de los engranes en el ensamblaje motor-reductor.

| Ensamblaje motor-reductor | | |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Parámetros del engranaje | | |
| Engrane | No. Dientes | Diámetro de paso |
| Corona | 51 | 102 mm |
| Sol | 13 | 26 mm |
| Planeta | 19 | 38 mm |

Para saber la relación de velocidad de cada fase se sustituyen los valores de la ecuación 8 por los de la tabla 7, dónde se obtiene que la relación de transmisión de cada fase $r_{t(fase)} = 0.2031$, esto es, que por cada rotación del engrane sol, el porta-planetas girará r_t rotaciones

$$r_{t(fase)} = \frac{13}{13 + 51} = \frac{13}{64} = 0.2031 \quad (8)$$

Del cálculo anterior es importante notar que $N_{sol} + N_{corona} = 64$, un divisible entre 4, de este modo cumpliendo la condición para colocar los engranes planetas con un espaciado uniforme sin que exista interferencia con los engranes corona y sol.

Para calcular la relación de velocidad total $r_{t(total)}$ se utiliza la ecuación 9, que multiplica las diferentes fases de un tren de engranajes.

$$r_{t(total)} = (r_{t(1)})(r_{t(2)})(r_{t(3)}) \dots (r_{t(n)}) \quad (9)$$

Para el ensamblaje motor-reductor existen dos fases con una relación de transmisión $r_{t(fase)} = 0.2031$. Sustituyendo los valores en la ecuación 9 se tiene que $r_{t(total)} = 0.2031$.

$$r_{t(total)} = (0.2031)(0.2031) = 0.04124$$

Para obtener la cantidad de rotaciones necesarias en la entrada para obtener una rotación en la salida, se utiliza el inverso de $r_{t(total)}$, cuyo valor es de $1/r_{t(total)} = 24.2483$.

$$\frac{1}{r_{t(total)}} = \frac{1}{0.04124} = 24.2483$$

4.3.5.2. Cálculo de esfuerzos de flexión de Lewis

La ecuación 10 muestra una simplificación de la ecuación de flexión de Lewis usada para determinar el esfuerzo máximo σ_{diente} , soportado por los dientes de un par de engranes dada una fuerza W^t en particular. El factor de forma de Lewis Y es un valor que depende de la cantidad de dientes en el engrane y puede obtenerse a través de la tabla 8

$$\sigma_{diente} = \frac{W^t K_v}{FmY} \quad (10)$$

Tabla 8: Valores del factor de forma de Lewis. (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

| Número de dientes | Y | Número de dientes | Y |
|-------------------|-------|-------------------|-------|
| 12 | 0.245 | 28 | 0.353 |
| 13 | 0.261 | 30 | 0.359 |
| 14 | 0.277 | 34 | 0.371 |
| 15 | 0.290 | 38 | 0.384 |
| 16 | 0.296 | 43 | 0.397 |
| 17 | 0.303 | 50 | 0.409 |
| 18 | 0.309 | 60 | 0.422 |
| 19 | 0.314 | 75 | 0.435 |
| 20 | 0.322 | 100 | 0.447 |
| 21 | 0.328 | 150 | 0.460 |
| 22 | 0.331 | 300 | 0.472 |
| 24 | 0.337 | 400 | 0.480 |
| 26 | 0.346 | Cremallera | 0.485 |

El factor de velocidad K_v para perfiles moldeados o de hierro fundido está dado por la ecuación 11, donde se utiliza la velocidad tangencial V con constantes específicas del proceso de manufactura (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008).

$$K_v = \frac{3.05 + V}{3.05} \quad (11)$$

La velocidad angular V se determina en base al radio r y la velocidad angular ω como se muestra en la ecuación 12. Finalmente, la velocidad angular se determina por medio de la ecuación 13, determinada en base a la frecuencia de rotación por minuto f_{rpm} . (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008)

$$V = r\omega \quad (12)$$

$$\omega = \frac{2\pi f_{rpm}}{60} \quad (13)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 13 por $f_{rpm} = 1200 \text{ RPM}$ se obtiene que $\omega = 125.6637 \text{ rad/seg}$.

$$\omega = \frac{2\pi(1200)}{60} = 125.6637 \text{ rad/seg}$$

Sustituyendo la velocidad angular $\omega = 125.6637 \text{ rad/seg}$ y el radio $r = \frac{0.026}{2} = 0.01$ de la tabla 7 (diámetro de paso del engrane sol en metros, dividido sobre 2) en la ecuación 12 se determina que $V = 1.6336 \text{ m/seg}$.

$$V = (0.013)(125.6637) = 1.6336 \text{ m/seg}$$

Sustituyendo la velocidad tangencial $V = 1.6336 \text{ m/seg}$ en la ecuación 11 se obtiene que $K_v = 1.5356$.

$$K_v = \frac{3.05 + 1.6336}{3.05} = 1.5356$$

Con un par de torsión de entrada $\tau_{entrada} = 5.634 \text{ Nm}$, el par máximo soportado por el engranaje en la segunda fase τ_{fase2} se obtiene por medio de la ecuación 14, que multiplica el par por el inverso de la relación de transmisión de la primera fase $r_{t(fase)} = 0.2031$ calculado previamente. Al sustituir los anteriores valores en la ecuación 14 se obtiene que el par máximo será de $\tau_{fase2} = 27.74 \text{ Nm}$.

$$\tau_{fase2} = (\tau_{entrada}) \left(\frac{1}{r_{t(fase)}} \right) \quad (14)$$

$$\tau_{fase2} = (5.634) \left(\frac{1}{0.2031} \right) = 27.74 \text{ Nm}$$

Considerando el par de torsión $\tau_{fase2} = 27.74 Nm$, componente tangencial de la fuerza aplicada en los dientes del engranaje W^t se obtiene utilizando la ecuación 15.

$$W^t = \frac{\tau_{fase2}}{r} \quad (15)$$

Usando el radio $r = \frac{0.026}{2} = 0.013$ de la tabla 7 se calcula que la componente tangencial $W^t = 2133.8484 N$

$$W^t = \frac{27.74}{0.013} = 2133.8484 N \approx 2.134 kN$$

El módulo m se calcula dividiendo el diámetro de paso de un engrane $d_{engrane}$ sobre la cantidad de dientes $N_{engrane}$ de este como se muestra en la ecuación 16. Sustituyendo los valores en dicha ecuación por los del engrane sol encontrados en la tabla 7 se obtiene que $m = 2$.

$$m = \frac{d_{engrane}}{N_{engrane}} \quad (16)$$

$$m = \frac{26}{13} = 2$$

El ancho de cara F se obtiene multiplicando el ancho de cara de un engrane $F_{engrane} = 12.85$ por la cantidad de engranes planeta en el porta-planetas. El ensamblaje motor-reductor cuenta se utilizó $N_{planetas} = 4$. En la ecuación 17 se determinó que $F = 51.4 mm$.

$$F = (F_{engrane})(N_{planetas}) \quad (17)$$

$$F = (12.85)(4) = 51.4$$

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

Usando un módulo $m = 2$ una fuerza tangencial $W^t = 2134 N$, una constante de velocidad $K_v = 1.5356$ y un factor de forma de Lewis $Y = 0.245$ de la tabla 8. Se calcula que para un ancho de cara $F = 51.4 mm$ el esfuerzo soportado por diente $\sigma_{diente} = 130.1107 MPa$

$$\sigma_{diente} = \frac{(2134)(1.5356)}{(51.4)(2)(0.245)} = \frac{3276.9704}{25.186} = 130.1107 MPa \approx 130 MPa$$

Considerando que el material de fabricación para el ensamblaje motor-reductor es acero SAE 1012 Rolado en caliente (HR), se obtiene de la tabla 9 que la resistencia a la fluencia es para este material es $S_y = 210 MPa$. El factor de diseño n_d se obtiene por medio de la ecuación 18.

$$n_d = \frac{\sigma_{diente}}{S_y} \quad (18)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 18 por $S_y = 210 MPa$ y $\sigma_{diente} = 130.1107 MPa$ se calcula que $n_d = 1.614$, un factor superior a la unidad que se considera como satisfactorio para este diseño.

$$n_d = \frac{130.1107}{210} = 1.614 > 1$$

TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO
Instituto Tecnológico de Colima

Tabla 9: Resistencias mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD) (Budynas, Nisbett, & Ríos Sánchez, 2008).

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-------------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| UNS núm. | SAE y/o AISI núm. | Procesamiento | Resistencia a la tensión, MPa (kpsi) | Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi) | Elongación en 2 pulg, % | Reducción en área, % | Dureza Brinell |
| G10060 | 1006 | HR | 300 (43) | 170 (24) | 30 | 55 | 86 |
| | | CD | 330 (48) | 280 (41) | 20 | 45 | 95 |
| G10100 | 1010 | HR | 320 (47) | 180 (26) | 28 | 50 | 95 |
| | | CD | 370 (53) | 300 (44) | 20 | 40 | 105 |
| G10150 | 1015 | HR | 340 (50) | 190 (27.5) | 28 | 50 | 101 |
| | | CD | 390 (56) | 320 (47) | 18 | 40 | 111 |
| G10180 | 1018 | HR | 400 (58) | 220 (32) | 25 | 50 | 116 |
| | | CD | 440 (64) | 370 (54) | 15 | 40 | 126 |
| G10200 | 1020 | HR | 380 (55) | 210 (30) | 25 | 50 | 111 |
| | | CD | 470 (68) | 390 (57) | 15 | 40 | 131 |
| G10300 | 1030 | HR | 470 (68) | 260 (37.5) | 20 | 42 | 137 |
| | | CD | 520 (76) | 440 (64) | 12 | 35 | 149 |

4.4. Diseño eléctrico y electrónico

Esta sección describe los elementos eléctricos y electrónicos utilizados en el desarrollo del UGV agrícola. Se incluye un análisis de diseño para cada uno de los elementos basado en los requerimientos iniciales mostrados en la tabla 3.

4.4.1. Descripción general

El sistema eléctrico en el UGV agrícola se organiza de la siguiente manera. Se tiene una fuente de poder basada en una batería de 12 V que energiza los módulos de cómputo, control, actuadores y sensores. El módulo de control se encarga manipular los diferentes elementos del módulo de actuadores basado en los comandos recibidos por el módulo de cómputo. El módulo de control también sirve como intérprete entre el módulo de sensores y de cómputo, leyendo la información proporcionada por los sensores y distribuyendo al módulo de cómputo cuando sea solicitada. El módulo de actuadores consiste de motores de tracción encargados del movimiento del vehículo así como actuadores secundarios utilizados en la aplicación de agroquímicos.

4.4.2. Diseño del controlador de motores BLDC

4.4.2.1. Consideraciones iniciales

El módulo de control cuenta con dos ESC para motores BLDC cuyos parámetros de diseño se basan en los motores de tracción a utilizar. Las características eléctricas provenientes de la hoja de datos del motor BLDC 8318 se muestran en la tabla 10.

Tabla 10: Características eléctricas del motor BLDC 8318.

| Motor BLDC 8318 | |
|-----------------------------------|---------------|
| Características eléctricas | |
| Voltaje | 11.1 - 51.8 V |
| Corriente sin carga | 1.2 A a 10 V |
| Corriente de operación | 44 A |
| Corriente máxima I_{\max} | 59 A |
| Potencia máxima | 3200 W |
| Constante K_v | 100 RPM/V |
| Peso | 630 g |

Las características del motor BLDC 8318 exigen corrientes de operación en el rango de 44 a 59 A mientras que la batería proporciona un voltaje de operación de 12V, Se eligió un MOSFET cuyas características eléctricas se adaptaran lo más posible a las condiciones de voltaje y corriente presentes en el UGV agrícola. La tabla 11 muestra las características del MOSFET canal N IRF1404.

Tabla 11: Características eléctricas del MOSFET IRF1404.

| MOSFET IRF1404 | |
|---|-------------------------------|
| Características eléctricas | |
| Canal de operación | N |
| Voltaje fuente-drenaje máximo V_{DSS} | 40 V |
| Resistencia de estado activo a 25 °C $R_{DS(on)25^\circ}$ | 0.004 Ω o 4 m Ω |
| Voltaje Compuerta-Fuente de activación $V_{GS(th)}$ | 4 V |
| Capacitancia de transferencia en reversa C_{CRSS} | 223 pF |
| Temperatura de operación T_j | -55 a 175 °C |

4.4.2.2. Análisis térmico del controlador

Los elementos críticos en términos de disipación de calor son los MOSFET. La potencia total P_{Total} disipada por estos componentes está dada por la ecuación 19.

$$P_{Total} = P_{Resistiva} + P_{Conmutación} \quad (19)$$

La potencia disipada por conmutación $P_{Conmutación}$ está dada por la ecuación 20, calculada en base a la capacitancia de transferencia en reversa C_{CRSS} , el voltaje de entrada V_{in} , la frecuencia de conmutación f_{SW} , la corriente de carga I_{Carga} y la corriente en la compuerta del MOSFET $I_{Compuerta}$

$$P_{Conmutación} = \frac{(C_{CRSS})(V_{in})^2 (f_{SW}) (I_{Carga})}{I_{Compuerta}} \quad (20)$$

Para calcular la potencia de conmutación es necesario considerar un escenario en dónde se presentará la máxima disipación posible, para ello se consideran los parámetros eléctricos del MOSFET IRF1404 de la tabla 8, se tiene que $C_{CRSS} = 223 \text{ pF}$, la batería proporciona un voltaje $V_{in} = 12V$. El ESC usa una frecuencia $f_{SW} = 50KHz$ y el motor BLDC 8318 proporciona una corriente máxima $I_{Carga} = 53A$ como se indica en la tabla 10. La compuerta del MOSFET está conectada en

serie con una resistencia $R_G = 100\Omega$, limitando la corriente de tal forma que $I_{Compuerta} = 100mA$

Sustituyendo los valores en la ecuación 20 por los mencionados previamente se tiene la siguiente ecuación.

$$P_{Conmutación} = \frac{(223)10^{-12}(12)^2 (50000) (59)}{0.1}$$

Despejando los valores se tiene que $P_{Conmutación} = 0.9473 W$ para una situación de carga máxima.

$$P_{Conmutación} = \frac{0.09473}{0.1} = 0.9473 W$$

Para calcular la componente resistiva de la potencia disipada es necesario conocer la resistencia del MOSFET cuando este está en su límite de temperatura de operación $T_{j(max)}$. En la tabla 8 se tiene que el MOSFET IRF1404 tiene una $T_{j(max)} = 175^\circ C$. La resistencia $R_{D(on)}$ varía con la temperatura de la unión de tal forma que a mayor temperatura se tiene una mayor resistencia $R_{DS(on)}$. La figura 41 muestra una gráfica normalizada de la resistencia contra la temperatura de la unión para el IRF1404, donde se tiene cuando $T_j = 175^\circ$ $R_{DS(on)175^\circ}$ es igual al doble de la resistencia $R_{DS(on)}$ cuando $T_j = 25^\circ$ como se muestra en la ecuación 21.

$$R_{DS(on)175^\circ} = 2(R_{DS(on)25^\circ}) \quad (21)$$

En la tabla 11 se tiene que $R_{DS(on)25^\circ} = 4m\Omega$, despejando los valores en la ecuación 21 se tiene que $R_{DS(on)175^\circ} = 8 m\Omega$.

$$R_{DS(on)175^\circ} = 2(4)m\Omega = 8m\Omega$$

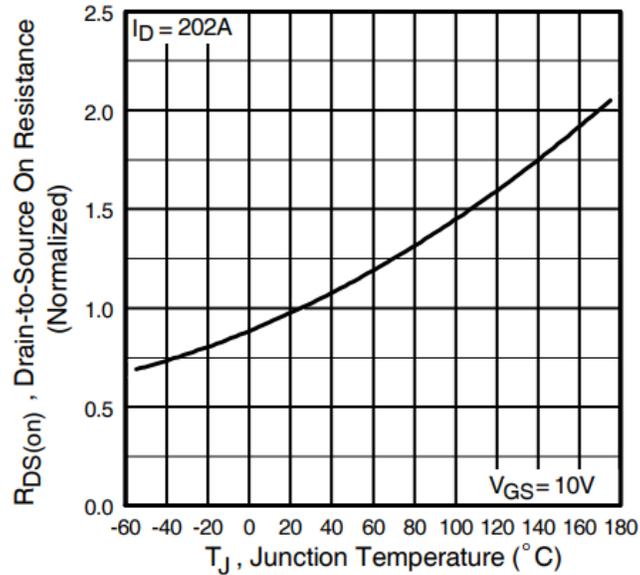


Figura 41: Resistencia $R_{DS(on)}$ contra temperatura de la unión T_j para el MOSFET IRF1404. (Infineon Technologies AG, 2016).

La componente resistiva $P_{Resistiva}$ de la potencia disipada P_{Total} está dada por la ecuación 22, que considera la corriente $I_{Carga} = 59A$ y la resistencia $R_{DS(on)175^\circ} = 8m\Omega$.

$$P_{Resistiva} = (I_{Carga})^2(R_{DS(on)175^\circ}) \quad (22)$$

Sustituyendo los valores de la ecuación 22 se determina que $P_{Resistiva} = 27.848 W$.

$$P_{Resistiva} = (59)^2(0.008)$$

$$P_{Resistiva} = (59)^2(0.008) = (3481)(0.008) = 27.848 W$$

Sustituyendo en la ecuación 19 con $P_{Resistiva} = 27.848 W$ y $P_{Conmutacion} = 0.9473 W$ se tiene que $P_{Total} \approx 29 W$.

$$P_{Total} = 27.848 + 0.9473 = 28.7953 \approx 29 W$$

La potencia disipada por dispositivo $P_{Dispositivo}$ está dada por la ecuación 23, en donde se divide la potencia P_{Total} total por la cantidad de dispositivo $N_{dispositivos}$.

$$P_{Dispositivo} = \frac{P_{Total}}{N_{Dispositivos}} \quad (23)$$

Dado que un controlador para motores BLDC debe tener 6 dispositivos para realizar la conmutación, para este caso estos son 6 MOSFET IRF1404. Sustituyendo los valores de la ecuación 23 por $P_{Total} = 29 \text{ W}$ y $N_{Dispositivos} = 6$ se tiene que $P_{Dispositivo} = 4.8333 \text{ W}$.

$$P_{Dispositivo} = \frac{29}{6} = 4.8333 \text{ W}$$

4.4.3. Análisis electromecánico del motor BLDC8318

La batería usada en el UGV agrícola tiene un voltaje de entrada $V_{in} = 12V$. Dada la constante de velocidad $Kv = 100 \text{ RPM/V}$ presente en el motor BLDC 8318, la velocidad máxima posible del motor está dada por la ecuación 24.

$$RPM_{max} = (KV)(V_{in}) \quad (24)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 24 se tiene que $RPM_{max} = 1200 \text{ RPM}$.

$$RPM_{max} = (100)(12) = 1200 \text{ RPM}$$

Transformando la velocidad máxima RPM_{max} en valores de velocidad angular ω_{max} se utiliza la ecuación 25.

$$\omega_{max} = \frac{2\pi (RPM_{max})}{60} \quad (25)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 25 se tiene que $\omega_{max} = 125.6637 \text{ rad/seg}$.

$$\omega_{max} = \frac{2\pi (1200)}{60} = 125.6637 \text{ rad/seg}$$

La constante de torque Kt está dada por la ecuación 16. Considerando los las características del motor BLDC 8318 de la tabla 10 se tiene $Kv = 100 \text{ RPM/V}$. Sustituyendo este valor en la ecuación 26 se tiene que $Kt = 0.095492 \frac{Nm}{A}$.

$$Kt = \frac{60}{2\pi(Kv)} \quad (26)$$

$$Kt = \frac{60}{2\pi(100)} = 0.095492 \frac{Nm}{A}$$

Para calcular el par de torsión máximo τ_{max} obtenible por el motor se utiliza la ecuación 27.

$$\tau_{max} = Kt(I_{max}) \quad (27)$$

Sustituyendo los valores con las características del motor BLDC 8318 de la tabla 10 en la ecuación 27 con $I_{max} = 59 \text{ A}$ y $Kt = 0.095492 \frac{Nm}{A}$ se calcula que el par máximo $\tau_{max} = 5.634 \text{ Nm}$.

$$\tau_{max} = 0.095492(59) = 5.634 \text{ Nm}$$

Para calcular el par de torsión en la salida del ensamblaje motor-reductor se utiliza la ecuación 28. Sustituyendo los valores con $r_{t(total)} = 0.04124$ y $\tau_{max} = 5.634 \text{ Nm}$, se tiene que el torque máximo en la salida del ensamblaje motor-reductor es de $\tau_{max(salida)} = 136.6149 \text{ Nm}$

$$\tau_{\max(salida)} = \left(\frac{1}{r_{t(total)}} \right) (\tau_{\max}) \quad (28)$$

$$\tau_{\max(salida)} = \left(\frac{1}{0.04124} \right) (5.634) = 136.6149 \text{ Nm}$$

5. Implementación

Este capítulo describe la implementación del prototipo del UGV agrícola así como las pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento de este.

5.1. Chasis

El chasis del UGV agrícola se construyó utilizando perfiles de aluminio cuadrados de 1.5 x 1.5 pulgadas de longitud cortadas en tramos que hacen la función de aristas en un polígono. Los tramos del chasis están unidos por medio de piezas de plástico ABS que hacen la función de nodos en un polígono. Las piezas se fijan entre sí con el uso de tornillos que atraviesan ambas piezas y son asegurados por medio de una tuerca. La figura 42 muestra el chasis ensamblado del UGV agrícola.



Figura 42: Chasis ensamblado del UGV agrícola.

5.2. Sistema de suspensión

Los soportes para la barra de torsión se construyeron utilizando plástico ABS, ensamblados en el chasis del UGV agrícola por medio de tornillos colocados en orificios posicionados estratégicamente para cumplir los requerimientos de diseño. La figura 43 muestra un soporte fijo usado para fijar la barra de torsión con el chasis y un soporte móvil, uniendo la barra de torsión al chasis mientras que permite que esta gire sobre su propio eje



Figura 43: Soportes para el sistema de suspensión del UGV agrícola.

5.3. Ensamblaje masa-rueda

El UGV agrícola emplea 4 ruedas de 9" de diámetro originalmente usadas en carretillas de carga "diablitos". Las ruedas están fabricadas de hule sólido que evita que sufran los problemas presentes en las ruedas neumáticas. La figura 46 muestra una de estas ruedas utilizadas en el UGV agrícola.

El ensamblaje masa-rueda se construyó utilizando plástico ABS unido con tornillos insertados en diferentes orificios roscados presentes en las piezas. El rodamiento utilizado es el 6303 incluido con las ruedas de 9" mencionadas anteriormente. La figura 44 muestra el ensamblaje masa-rueda con y sin la rueda montada.



Figura 44: Ensamblaje masa-rueda del UGV agrícola.

5.4. Ensamblaje motor – reductor

El ensamblaje motor reductor se construyó utilizando principalmente plástico ABS. Se utilizaron rodamientos axiales AXK3047 en el ensamblaje para soportar las cargas axiales internas. La figura 45 muestra el ensamblaje motor-reductor montado en el tren motriz del UGV agrícola.



Figura 45: Ensamblaje motor-reductor del UGV agrícola.

5.5. Controlador para motor BLDC 8318

El controlador para el motor BLDC8318 se colocaron en una carcasa hecha de plástico ABS y se montó sobre un ensamblaje motor-reductor del UGV agrícola como se observa en la figura 46. Se utilizaron conectores de grado automotriz para conectar cada uno de los ensamblajes motor-reductor a su respectivo controlador.

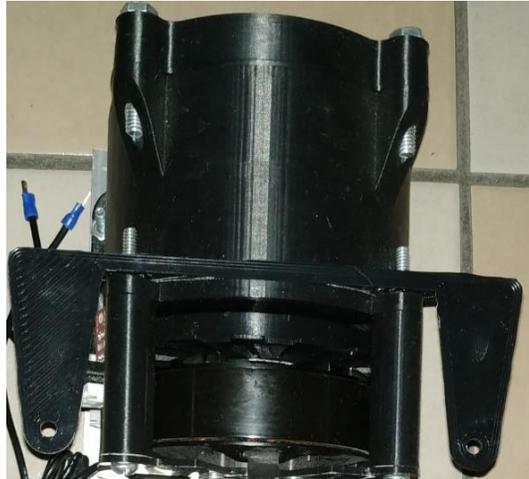


Figura 46: Estructura de montaje para el controlador de motores BLDC.

5.6. Tren motriz

Se construyó la estructura del ensamblaje de tren motriz a partir de soleras de aluminio de 2 pulgadas de ancho por 3/16 de grosor en dónde se montaron los componentes del tren motriz para el UGV agrícola. La figura 47 muestra el ensamblaje del tren motriz mientras que la figura 48 muestra este montado en el chasis del UGV agrícola.



Figura 47: Ensamblaje de tren motriz.



Figura 48: Componentes del tren motriz montados en el chasis del UGV agrícola.

5.7. Interfaz de control AgR Controller

Se desarrolló una interfaz WEB denominada *AgR Controller* con motivo de dirigir el UGV agrícola desde cualquier ordenador conectado a la misma red local que este, dada la dirección IP correspondiente al UGV agrícola se haya ingresado en el navegador WEB. La figura 49 muestra la vista presentada al ingresar a la interfaz de control.



Figura 49: Interfaz de control AgR Controller.

6. Pruebas

Finalizado el desarrollo del UGV agrícola se prepararon una serie de pruebas con fin de comprobar la correcta operación de las diferentes funciones incorporadas en este, como lo es la comunicación con la interfaz WEB, cambio de dirección y velocidad de respuesta de los motores BLDC 8318.

6.1. Tiempo de arranque

El UGV agrícola cuenta con un interruptor maestro usado para proporcionar o cortar el suministro eléctrico a este basado en la decisión del operador.

Debido a la naturaleza del módulo de cómputo basado en la SBC Raspberry Pi 3 Modelo B mostrado en la figura 50, el sistema operativo montado en este tiene un tiempo de arranque que evita la operación del UGV agrícola al momento del encendido. Para ello se preparó una prueba en la cual se encenderá el UGV agrícola por medio del interruptor maestro y se medirá el tiempo requerido para poder acceder a la interfaz WEB de este.

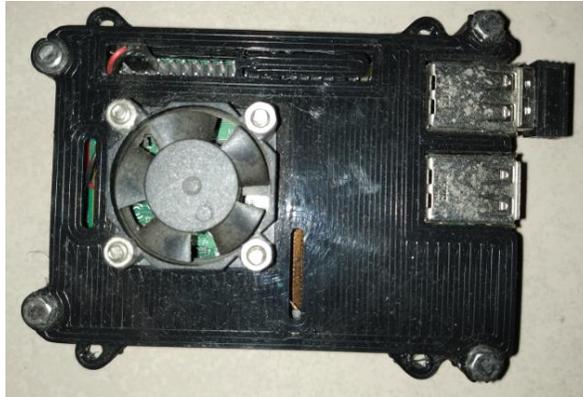


Figura 50: Raspberry pi 3 Modelo B usado como módulo de cómputo en el UGV agrícola.

6.2. Comunicación con la interfaz WEB

Para comprobar una conexión exitosa y estable entre el UGV agrícola y el operador de este se realizó una prueba de conexión que consiste del envío de comandos de movimiento hacia el UGV agrícola, este por su parte debe responder con un mensaje de respuesta indicando que el mensaje se ha recibido así como los detalles de este.

El procedimiento de la prueba es el siguiente:

1. El usuario ingresa a la interfaz AgR Controller
2. El usuario hace clic en la liga "Control manual" en la parte superior derecha de la pantalla.
3. El usuario debe visualizar el mensaje "Conexión de control establecida exitosamente" al momento de ingresar a esta liga, de lo contrario se desplegará el mensaje "Conexión de control fallida".
4. El usuario hace clic en el área de control del vehículo ubicada del lado izquierdo de la pantalla.
5. El usuario envía un mensaje de dirección al UGV agrícola al presionar una tecla de dirección.
6. Con cada tecla presionada el usuario debe visualizar una imagen mostrando la dirección de movimiento que están tomando los motores en el UGV agrícola.

La figura 51 muestra la vista de control manual en la interfaz AgR Controller.

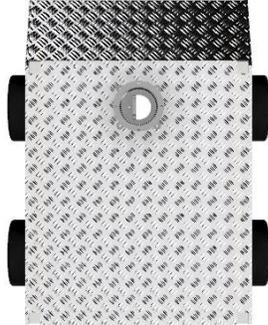


Figura 51: Sección de control manual en la interfaz AgR Controller.

6.3. Alcance de conexión

El UGV agrícola cuenta con un transmisor IEEE 802.11b (mejor conocido como Wi-Fi) integrado en la SBC Raspberry Pi 3. Se realizarán pruebas de alcance de conexión con para determinar el alcance máximo de la conexión con el hardware actual.

7. Resultados

7.1. Tiempo de arranque

Se realizaron 5 corridas para determinar el tiempo de arranque promedio de la interfaz WEB. Los resultados de las pruebas de tiempo de arranque se muestran en la tabla 12

Tabla 12: Resultados de las pruebas de tiempo de arranque.

| Tiempo de arranque | |
|--------------------|-------------|
| No. corrida | Tiempo (S) |
| 1 | 34 |
| 2 | 38 |
| 3 | 32 |
| 4 | 40 |
| 5 | 34 |
| Promedio | 35.6 |

7.2. Prueba de conexión

La figura 52 muestra los resultados de las pruebas de conexión con la interfaz WEB, dónde se observa el mensaje indicador de conexión exitosa con el sistema AgR Controller del UGV agrícola.

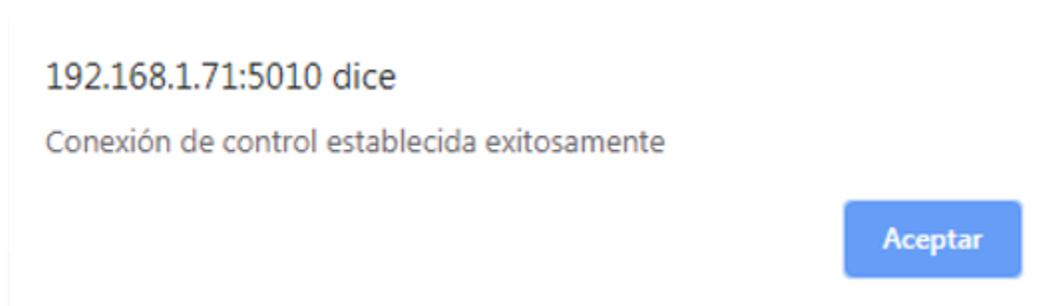


Figura 52: Mensaje indicador de conexión exitosa.

7.3. Transmisión de comandos

La figura 53 muestra los resultados de la prueba de transferencia de comandos con la interfaz WEB.

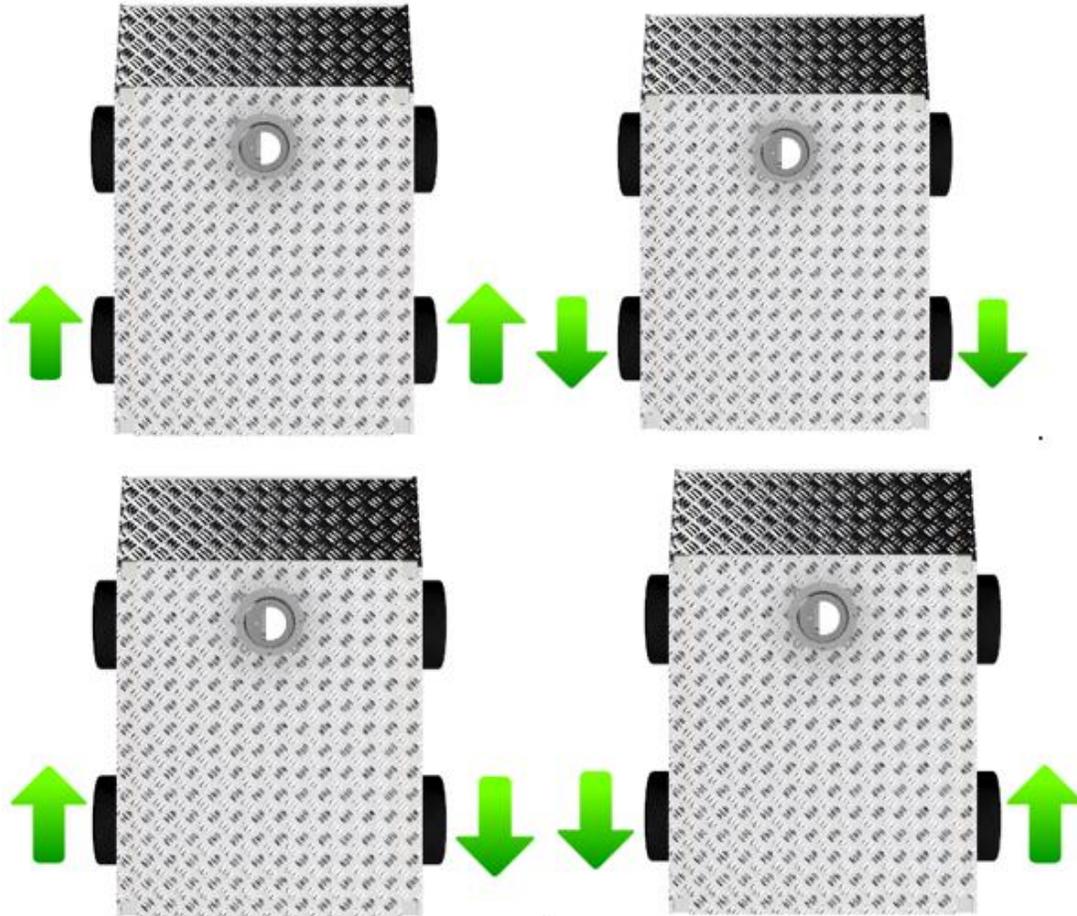


Figura 53: Comandos disponibles para los motores BLDC 8318 en la interfaz AgR Controller.

7.4. Alcance de comunicaciones

Se realizaron 5 corridas para determinar el alcance máximo de la interfaz WEB utilizando el transmisor Wi-Fi integrado en la SBC Raspberry Pi 3. Es importante notar que en esta prueba existen obstrucciones entre el UGV agrícola y el punto de conexión Wi-Fi.

Tabla 13: Resultado de prueba de comunicaciones.

| Alcance de comunicaciones | |
|----------------------------------|----------------------|
| No. corrida | Distancia (m) |
| 1 | 10 |
| 2 | 9 |
| 3 | 12 |
| 4 | 9 |
| 5 | 13 |
| Promedio | 10.6 |

7.5. Discusión de resultados

La tabla 12 muestra los resultados obtenidos para las pruebas de tiempo de arranque del sistema WEB AgR Controller, donde se observa que el tiempo de arranque promedio para la interfaz WEB es de 35.6 segundos, un tiempo de arranque aceptable considerando que sólo debe realizarse una vez con cada uso del UGV agrícola.

En la figura 52 se puede apreciar el mensaje indicador de conexión exitosa enviado por el sistema WEB AgR Controller, siempre y cuando se tuviera suficiente intensidad de señal. La tabla 53 muestra los resultados obtenidos en las pruebas de envío de comandos, donde se observan los diferentes comandos que se pueden dar a los motores BLDC 8318 del UGV agrícola, cabe destacar que estos indicadores visuales muestran en tiempo real las acciones que está realizando el UGV agrícola, habilitando al usuario para saber en todo momento las acciones que se están realizando.

La tabla 13 muestra los resultados de las pruebas de alcance de comunicaciones donde se obtuvo un alcance promedio de 10.6 metros considerado como demasiado corto para el área de operación del UGV agrícola, un indicador que el hardware transmisión IEEE 802.11b integrado en la SBC Raspberry Pi 3 no es suficiente para satisfacer esta necesidad.

8. Conclusiones

8.1. Discusión

A pesar de la inversión necesaria para su desarrollo, adquisición e implementación. El uso de UGV para realizar actividades en el sector agrícola representa una importante mejora tanto para los productores como para el medio ambiente en comparación con los métodos tradicionales, reduciendo la cantidad de material agrícola necesario para lograr un mismo volumen de producción y reduciendo los riesgos de exposición humana a los elementos químicos nocivos presentes en varios agroquímicos, particularmente en los pesticidas, usados comúnmente en la producción de plantas ornamentales.

8.2. Cumplimiento de los objetivos de la investigación

La investigación tuvo como resultados el modelo de un UGV controlado remotamente a través de un sistema WEB con propósito de realizar recorridos en plantíos y aplicar agroquímicos de manera autónoma utilizando técnicas de agricultura de precisión. Además se logró la construcción de prototipo de chasis y tren motriz para su uso como plataforma vehicular, siguiendo un enfoque de bajo costo y utilizando materiales disponibles localmente. Asimismo se desarrolló un sistema WEB que le permite al operador controlar el UGV de manera remota a través de la interfaz de control en este. El desarrollo de este vehículo por una parte reduce los riesgos a la salud de los trabajadores que realizan la aplicación de pesticidas, eliminando la posibilidad de absorción ocular o cutánea e inhalación de estos elementos tóxicos. Acción imprescindible en los procesos de producción de plantas ornamentales para eliminar los riesgos a corto y largo plazo efectos adversos a la salud e integridad de las personas. Por otra parte el uso de técnicas de agricultura de precisión incrementa el volumen de producción, incrementando la competitividad de los productores, como se expuso en la sección 2.1.

8.3. Las limitaciones de la investigación

La plataforma vehicular construida es de nivel prototipo, construido utilizando materiales de menor resistencia a los presentes en el modelo que carece de la rigidez necesaria para cumplir los parámetros de diseño presentados por el productor. También se presentan limitaciones en el alcance de las

comunicaciones, sin embargo, este problema puede solucionarse utilizando un hardware de mayor alcance.

8.4. Recomendaciones para continuar la investigación en lo futuro

Para continuar la investigación, se recomienda expandir el sistema de control WEB para incluir algoritmos de generación de rutas autónomas, además se recomienda incluir los elementos correspondientes al módulo de sensores en el modelo presentado como solución al problema, finalmente se recomienda incluir un sistema de aspersión que le permita al UGV agrícola aplicar agroquímicos sin necesidad de mover la plataforma completa.

Bibliografía

- Abu Dhabi Autonomous Systems Investments (ADASI). (2014). *WHAT IS AN AUTONOMOUS SYSTEM?* Retrieved from adasi.ae: <http://www.adasi.ae/autonomous-systems/what-is-an-autonomous-system.aspx>
- Ali Mazidi, M., McKinlay, R., & Causey, D. (2008). *PIC Microcontroller and Embedded Systems Using Assembly and C for PIC18*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Ballester, E., & Piqué, R. (2012). *Electrónica de potencia: Principios fundamentales y estructuras básicas*. Barcelona: Marcombo: ediciones técnicas.
- Banaszkiewicz, T. (2010). Evolution of Pesticide Use. *Contemporary Problems of Management and Environmental Protection*, 5, 7-18.
- Batista, A. V., Albiero, D., Viana, T. V., Monteiro, L. d., Chioderoli, C. A., Soares de Sousa, I. R., & Moreira Azevedo, B. (2017). Multifunctional Robot at low cost for small farms. *Ciência Rural*, 47(7).
- Budynas, R., Nisbett, J., & Ríos Sánchez, M. (2008). *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY Octava Edición*. Ciudad de México, México: McGRAW-HILL.
- Cáceres, D. (2015). Tecnología agropecuaria y agronegocios. La lógica subyacente del modelo tecnológico dominante. *Mundo Agrario*, 16(31).
- Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2003). *Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de materiales*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- Chapman, S. (2012). *Máquinas eléctricas* (Quinta ed.). México, D.F., México: McGraw Hill.
- Chen, S., Liu, G., & Zhu, L. (2017, Abril 27). Sensorless Control Strategy of a 315 kW High-Speed BLDC Motor Based on a Speed-Independent Flux Linkage Function. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11), 8607 - 8617.
- Chunyuan, B., Xiaoxia, L., & Guannan, Z. (2018, Marzo). The Peak Current Control of Permanent Magnet Brushless DC Machine with Asymmetric Dual-Three Phases. *CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS*, II(1), 129-135.
- COEPPLANTS. (2012). *COMITÉ SISTEMA PRODUCTO ORNAMENTALES (COEPPLANTS): PLAN RECTOR*. Colima.
- COMITÉ SISTEMA PRODUCTO ORNAMENTALES (COEPPLANTS). (2012). *PLAN RECTOR*. Colima.
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (2015, Abril 8). *CO AV-23/10 R2, QUE ESTABLECE LOS REQUERIMIENTOS PARA OPERAR UN SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA (RPAS)*. Retrieved Noviembre 18, 2017, from SCT.gov: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC/00-aeronautica/co-av-23-10-r2.pdf>

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

- Fait, A., Iversen, B., Tiramani, M., Visentin, S., & Maroni, M. (2001). Preventing Health Risks from the Use of Pesticides in Agriculture. Busto Garolfo, Milán, Italia: International Centre for Pesticide Safety.
- Fofilos, P., Xanthopoulos, K.-I., Romanos, E. A., Zikidis, K., & Kanellopoulos, N. (2014). KERVEROS I: An Unmanned Ground Vehicle for Remote-Controlled Surveillance. *Journal of Computations & Modelling*, 4(1), 223-236.
- Food and Agriculture Organization. (2017). *FAO/IAEA Co-ordinated Research Projects*. Retrieved from <http://www.naweb.iaea.org/nafa/crp/types.html>
- García Gutiérrez, C., & Rodríguez Meza, G. D. (2012, Agosto). PROBLEMÁTICA Y RIESGO AMBIENTAL POR EL USO DE PLAGUICIDAS EN SINALOA. *Ra Ximhai: Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 8(3), 1-10.
- García Pérez, L. (2003, Diciembre). NAVIGACIÓN AUTÓNOMA DE ROBOTS EN AGRICULTURA: UN MODELO DE AGENTES. Madrid.
- Goodarzi, A., & Khajepour, A. (2017). *Vehicle Suspension System Technology and Design*. Waterloo: Morgan & Claypool Publishers.
- Grains Research and Development Corporation (GRDC). (2010, Noviembre). *A General Introduction to Precision Agriculture*. Retrieved from [agriprecisione.it: http://www.agriprecisione.it/wp-content/uploads/2010/11/general_introduction_to_precision_agriculture.pdf](http://www.agriprecisione.it/wp-content/uploads/2010/11/general_introduction_to_precision_agriculture.pdf)
- Infineon Technologies AG. (2016). *IRF1404*. Retrieved from [irf.com: http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf1404.pdf](http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf1404.pdf)
- International Labor Organization (ILO). (1991). *Safety and health in the use of agrochemicals: a guide*. Geneva.
- Jian, F., Kun, L., & Qing, W. (2018, Marzo 22). Scheme based on buck-converter with three-phase H-bridge combinations for high-speed BLDC motors in aerospace applications. *IET Electric Power Applications*, XII(3), 405 - 414.
- Joyanes Aguilar, L. (2008). *Fundamentos de programación: Algoritmos, estructura de datos y objetos, Cuarta edición*. Madrid: McGRAW-HILL.
- Koutsos, T., & Menexes, G. (2017). Benefits from the adoption of precision agriculture technologies. A systematic review. *18th Panhellenic Forestry Congress & International Workshop*, (pp. 1-12). Edesa.
- Microchip Technology Inc. (2019). *PIC18F26K40*. Retrieved from [microchip.com: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F26K40](https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F26K40)
- Naik, N., Shete, V., & Danve, S. (2016). Precision agriculture robot for seeding function. *2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, (pp. 1-3). Coimbatore. doi:10.1109
- Negrete, J. C. (2011, Noviembre). Políticas de mecanización agrícola en México. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 1-22.

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

- Núñez V., J., Fonthal R., F., & Quezada L., Y. (2017). Design and Implementation of WSN for Precision Agriculture in White Cabbage Crops. *2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, (pp. 1-4).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para el Productor Hortofrutícola* (Segunda ed.). Santiago de Chile, Chile.
- Pei, W., Lan, Y., Xiwen, L., Zhiyan, Z., Wang, Z., & Wang, Y. (2014, Abril). Integrated sensor system for monitoring rice growth conditions based on unmanned ground vehicle system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(2), 75-81.
- Pingali, P., Bigot, Y., & Binswagner, H. P. (1987). *Agricultural Mechanization and the Evolution of Farming Systems in Sub-Saharan Africa*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- Qian, Z., & Ming, F. (2017, Diciembre 12). Combined commutation optimisation strategy for brushless DC motors with misaligned hall sensors. *IET Electric Power Applications*, 301-307. doi:10.1049
- Ramírez Morales, I., Ruilova Reyes, B., & Garzón Montealegre, J. (2015). *INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN EL SECTOR AGROPECUARIO* (Primera ed.). Machala, El Oro, Ecuador.
- Raspberry Pi Foundation. (2019). *Raspberry Pi 3 Model B+*. Retrieved from raspberrypi.org: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- Rashid, M. (1995). *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones* (Segunda ed.). (G. Sánchez García, Trans.) Estado de México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Raspberry Pi Foundation. (2019). *Debian*. Retrieved from raspberrypi.org: <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian/>
- SKF Group. (2019). *Deep groove ball bearings, single row, for high temperature applications*. Retrieved from skf.com: <https://www.skf.com/us/products/bearings-units-housings/engineered-products/high-temperature-bearings/dgbb-single-row/index.html>
- Solleiro, J. L., & del Carmen, M. (1993, Abril). La innovación tecnológica en la agricultura mexicana. *comercio exterior*, 245, 353-369.
- Sourangsu, B. (2014). Design and Implementation of an Unmanned Vehicle Using A GSM Network without Microcontrollers. *Journal of Electrical Engineering*, 14(1).
- Tabile, R., Godoy, E., Pereira, R., Tangerino, G., Porto, A., & Inamasu, R. (2011). DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF AN AGRICULTURAL MOBILE ROBOT. *Engenharia Agrícola*, 32(1), 130-142.
- Tamaki, K., Nagasaka, Y., Nishiwaki, K., Saito, M., Kikuchi, Y., & Motobayashi, K. (2013). A Robot System for Paddy Field Farming in Japan. *4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture*, (pp. 143-147). Espoo, Finland.
- Thrall, P. H., Bever, J. D., & Burdon, J. J. (2010). Evolutionary change in agriculture: the past, present and future. *Evolutionary Applications*, 405-408.

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Colima

Tokekar, P., Vander Hook, J., Mulla, D., & Isler, V. (2016, Octubre 10). Sensor Planning for a Symbiotic UAV and UGV system for Precision Agriculture. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6). doi:10.1109/TRO.2016.2603528

Vargas Gonzalez, O. C. (2017, Agosto). *Tecnologías Bluetooth Aplicadas al Control de Vehículos Terrestres No Tripulados para Aspersión de Agroquímicos*.

Weidong, Z., Chun, W., & Jing, H. (2010). Development of agriculture machinery aided guidance system based on GPS and GIS. *2010 World Automation Congress*, (pp. 313-317). Kobe.