



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
DURANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
DEL VALLE DEL GUADIANA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“Control de vehículo terrestre en maniobras de
posicionamiento autónomo de precisión”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

César Alejandro Hernández Ledesma

Director de tesis:

Efraín Ibarra Jiménez

Co-Director:

José Antonio Martínez Rivera

Durango, Dgo. México, mayo, 2022.





Control de vehículo terrestre en maniobras de posicionamiento autónomo de precisión

Presenta:

Ing. César Alejandro Hernández Ledesma

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Efraín Ibarra Jiménez Director	<u>Efraín Ibarra J.</u> Firma
M.C. José Antonio Martínez Rivera Codirector	<u>[Signature]</u> Firma
M.I. Eduardo Gamero Inda Asesor	<u>[Signature]</u> Firma
Dr. Francisco Javier Godínez García Asesor	<u>[Signature]</u> Firma

M.C. José Antonio Martínez Rivera

[Signature]

Coordinador del programa de la maestría
en ingeniería.

M.C. Adriana Eréndira Murillo

Adriana E. Murillo

Jefa de la División de Estudios de
Posgrado e Investigación

Durango, Dgo. México

mayo de 2022





Victoria de Durango, Dgo., a **24 / Mayo / 2022.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 176 / 22.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. CÉSAR ALEJANDRO HERNÁNDEZ LEDESMA
No. DE CONTROL G08040972
P R E S E N T E .

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

"Control de vehículo terrestre en maniobras de posicionamiento autónomo de precisión"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM'ammc.





Victoria de Durango, Dgo., a **24 / Mayo / 2022.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 175 / 22.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. CÉSAR ALEJANDRO HERNÁNDEZ LEDESMA
No. DE CONTROL G08040972
P R E S E N T E .

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

“Control de vehículo terrestre en maniobras de posicionamiento autónomo de precisión”

CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	MATERIALES Y MÉTODOS
CAPÍTULO IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	REFERENCIAS
	ANEXOS

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
“La Técnica al Servicio de la Patria”

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM'ammc.



Fecha de Validación: 2022-05-24
Fecha de Emisión: 2022-05-24
Fecha de Modificación: 2022-05-24
Fecha de Cancelación: 2022-05-24
ASGC 857





Agradecimientos

A través del presente trabajo agradezco a todos aquellos que han hecho esto posible.

A mi familia por su apoyo incondicional, a mi padre César por su buen ejemplo, a mi madre Rocío por sus consejos y a mis hermanos Óscar y David de quienes siempre aprendo.

A mis maestros del posgrado por su dirección y apoyo, así como los conocimientos que de ellos me fueron transmitidos, particularmente a mi director de tesis, al Dr. Efraín Ibarra Jiménez por su gran apoyo y dirección.

A todos muchas gracias.





Resumen

Al igual que otros sectores, la agricultura está pasando por un proceso de cambios en los que la automatización juega un rol fundamental. Nuevas tecnologías tales como tractores automáticos se están ya desarrollando, por ello es importante continuar estudiando este campo para así proponer soluciones más eficientes y que se adapten a los desafíos del agricultor del mundo moderno.

El trabajo aquí mostrado presenta el armado y puesta en marcha de un vehículo terrestre no tripulado, para realizar seguimiento autónomo de trayectorias en el campo. Se plantea un control teórico por modos deslizantes el cual podría ser utilizado de forma adicional a los controladores de fábrica para realizar el control del mismo.

Para llevar a cabo lo anterior, se utiliza una placa de control Pixhawk 2.4.8 en conjunto con el programa de control Mission Planner© o alternativamente QGroundControl©, a su vez se utiliza un bastidor Traxxas tipo Rover y un conjunto de sensores tales como el sistema de posicionamiento global, un par de módulos de telemetría, así como actuadores que se encuentran disponibles en el mercado y que cuentan con soporte técnico actualizado.





Abstract

Like other sectors, agriculture is going through a process of change in which automation plays a fundamental role. New technologies such as automatic tractors are already being developed, so it is important to continue studying this field in order to propose more efficient solutions that adapt to the challenges of the modern world farmer.

This work shown here presents the assembly and start-up of an unmanned ground vehicle, to carry out autonomous tracking of trajectories in the field. A theoretical control by sliding modes is proposed, which could be used in addition to the factory controllers to control it.

To carry out the above, a Pixhawk 2.4.8 control board is used in conjunction with the Mission Planner© control program or alternatively QGroundControl©, in turn a Rover-type Traxxas frame is used and a set of sensors such as the global positioning system, a couple of telemetry modules, as well as actuators that are available on the market and that have up-to-date technical support.





Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Justificación.....	4
Delimitación del problema.....	5
Estado del arte	6
Thorvald II	6
Husky UGV.....	7
Terrasentia.....	8
Capítulo 2 Capítulo Marco teórico.....	10
Enfoques teóricos de control por modos deslizantes aplicado a vehículo terrestre.....	10
Modelo cinemático del vehículo terrestre	11
Dinámicas del vehículo en término de los errores.....	12
Ángulos deseados de navegación.....	12
Controladores y ángulos de navegación.....	13
Ecuaciones de los controles y ángulos deseados.....	15
Capítulo 3 Materiales y métodos.....	17
Modelo previo	17
Componentes electrónicos y mecánicos del vehículo terrestre no tripulado modelo definitivo ...	23
Pixhawk 2.4.8.....	23
GPS SE 100.....	26
Módulo de poder 90A	28
ESC (<i>Electronic Speed Control</i>)	29
RadioLink 2.4 GHz Traxxas	30
Servomotor de dirección Traxxas	31
Motor Titan 21L:.....	32
Batería LiPo Turnigy 5.0.....	33
Cargador Traxxas	34
Servomotor MG995 Tower Pro.....	35





Cámara GoPro Hero 7	36
Módulos de telemetría 433MHz (Genérico)	37
Mando remoto Flysky fs-i6-m2.....	38
Receptor Flysky FS-IA6B	39
Buzzer (genérico)	39
Botón de <i>reset</i>	40
Frame Traxxas Defender	40
Montura de PLA para unidad GPS.....	42
Plataforma de PLA para componentes del vehículo	43
Carcasa protectora de los componentes electrónicos y mecánicos	44
Programación de trayectorias	47
Mission Planner©	47
QGroundControl©	48
Capítulo 4 Resultados y discusión	50
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	55
Referencias.....	56
Anexos.....	58





Índice de figuras

Figura 5-1 Thorvald II desplegado.....	6
Figura 5-2 Thorvald II con extremidades contraídas para operación en interiores.....	6
Figura 5-3 Diferentes configuraciones para Thorvald II.....	7
Figura 5-4 Husky UGV realizando tareas de polinización.....	8
Figura 5-5 Robot Earthsense.....	8
Figura 6-1 Seguimiento de una trayectoria con convergencia en tiempo finito.....	10
Figura 6-2 Diagrama del modelo matemático del vehículo terrestre no tripulado.....	11
Figura 6-3 Diagrama de la trayectoria con convergencia en tiempo finito.....	12
Figura 7-1 Control sencillo de pruebas desarrollado en Python.....	18
Figura 7-2 Fragmento de código en Arduino para control de módulo Bluetooth HC-05.....	19
Figura 7-3 Primer modelo del vehículo terrestre no tripulado escala 1:18 con Arduino como módulo principal de control.....	20
Figura 7-4 Pixhawk versión 2.4.8.....	23
Figura 7-5 Unidad GPS SE 100.....	26
Figura 7-6 Módulo de poder de 90A.....	28
Figura 7-7 Módulo ESC XL5HV.....	29
Figura 7-8 Módulo de radiocontrol Traxxas Link 2.4GHz, TQi.....	30
Figura 7-9 Servomotor de dirección Traxxas TRA2055 de alto torque.....	31
Figura 7-10 Motor Titán 21T.....	32
Figura 7-11 Batería de 3 celdas, Polímero de Litio (LiPo) a 11.1v, 5000mAh.....	33
Figura 7-12 Cargador Traxxas EZ Peak PLUS.....	34
Figura 7-13 Servomotor MG995 TowerPro.....	35
Figura 7-14 Cámara GoPro Hero 7 Black.....	36
Figura 7-15 Módulo en tierra 433MHz (izq.), Módulo para el Pixhawk 433MHz (der.), genéricos.....	37
Figura 7-16 Control remoto Flysky fs-i6-m2.....	38
Figura 7-17 Receptor Flysky FS-IA6B.....	39
Figura 7-18 Buzzer.....	40
Figura 7-19 Botón de armado del vehículo (reset).....	40
Figura 7-20 Traxxas Frame, vehículo tipo Rover.....	41
Figura 7-21 Base de PLA para unidad GPS.....	42
Figura 7-22 Bases de PLA para soporte de componentes electrónicos de a bordo.....	43
Figura 7-23 Diseño de las piezas del soporte principal para la circuitería de a bordo mediante el programa PrusaSlicer 2.1.1.....	44
Figura 7-24 Carcasas cuadrada y rectangular para protección de componentes electrónicos.....	45
Figura 7-25 Diagrama a bloques de las conexiones del vehículo terrestre no tripulado.....	46
Figura 7-26 Tipos de vehículos compatibles con Mission Planner®.....	47
Figura 7-27 Interfaz principal del programa Mission Planner®.....	48
Figura 7-28 Interfaz principal del programa QGroundControl®.....	48
Figura 7-29 Lecturas de los sensores en tiempo real (Prueba en laboratorio).....	49
Figura 8-1 Vehículo terrestre no tripulado terminado.....	50
Figura 8-2 Posición inicial.....	51





Figura 8-3 Programación de una trayectoria de 4 puntos.....	51
Figura 8-4 Inicio del recorrido, puntos 1 y 2.....	52
Figura 8-5 Seguimiento, punto 3.....	52
Figura 8-6 Finalización del recorrido de la trayectoria	53
Figura 8-7 Vehículo terrestre no tripulado recorriendo una trayectoria en tiempo finito	54
Figura 8-8 Programa de la trayectoria	54





Índice de tablas

Tabla 7-1 Especificaciones Arduino Nano.....	21
Tabla 7-2 Especificaciones técnicas del módulo bluetooth HC-05.....	22
Tabla 7-3 Procesadores de la placa Pixhawk 2.4.8.....	23
Tabla 7-4 Sensores integrados de la placa Pixhawk 2.4.8.....	24
Tabla 7-5 Interfaces de la placa Pixhawk 2.4.8.....	24
Tabla 7-6 Especificaciones eléctricas de la placa Pixhawk 2.4.8.....	24
Tabla 7-7 Especificaciones mecánicas de la placa Pixhawk 2.4.8.....	25
Tabla 7-8 Especificaciones de la unidad GPS SE100.....	27
Tabla 7-9 Módulo de poder 90A.....	28
Tabla 7-10 Especificaciones del módulo ESC XL5-HV.....	29
Tabla 7-11 Especificaciones del módulo Traxxas Link 6533 TQi 2,4GHz de 5 canales.....	30
Tabla 7-12 Especificaciones Traxxas TRA2055 servo de alto torque (servo de dirección).....	31
Tabla 7-13 Especificaciones del motor Titán 21 T 550 con rotación inversa.....	32
Tabla 7-14 Especificaciones de la batería LiPo Turnigy de 3 celdas.....	33
Tabla 7-15 Especificaciones Traxxas EZ Peak PLUS.....	34
Tabla 7-16 Especificaciones del servomotor MG 995 Tower Pro.....	35
Tabla 7-17 Especificaciones de la cámara GoPro Hero 7 Black.....	36
Tabla 7-18 Especificaciones de los módulos de telemetría de 433MHz (genérico).....	37
Tabla 7-19 Especificaciones del control remoto Flysky fs-i6-m2 transmisor de 6 canales.....	38
Tabla 7-20 Especificaciones del receptor Flysky FS-IA6B.....	39
Tabla 7-21 Especificaciones del frame.....	41
Tabla 7-22 Dimensiones del soporte para unidad GPS.....	43
Tabla 7-23 Dimensiones de la plataforma para la circuitería de a bordo.....	44
Tabla 7-24 Carcasa cuadrada de protección de componentes.....	45
Tabla 7-25 Carcasa rectangular de protección de componentes.....	45





Índice de ecuaciones

Ecuaciones 6-1 Modelo cinemático del vehículo terrestre.....	11
Ecuaciones 6-2 Dinámicas del vehículo en término de los errores	12
Ecuaciones 6-3 Control de velocidad y dirección	13
Ecuaciones 6-4 Primer proceso de desacoplamiento	13
Ecuaciones 6-5 Controles virtuales	13
Ecuaciones 6-6 Segundo proceso de desacoplamiento	14
Ecuaciones 6-7 Obtención de ángulos de navegación.....	14
Ecuación 6-8 Ángulo de orientación.....	14
Ecuación 6-9 Procedimiento intermedio para obtener Ángulo deseado de dirección.....	14
Ecuación 6-10 Ángulo deseado de dirección	15
Ecuación 6-11 Segundo y último proceso de desacoplamiento, continuación.....	15
Ecuaciones 6-12 Controles virtuales de posición V_x & V_y	15
Ecuaciones 6-13 Control de dirección y control de velocidad	16
Ecuación 6-14 Ángulos deseados de navegación.....	16





Capítulo 1 Introducción

La agricultura ha sido una de las principales actividades para el ser humano, ya que hace unos 10,500 años, (Ortuño, 2019), permitió el desarrollo de las primeras civilizaciones, sin embargo, es en los últimos años en los que la evolución de las herramientas para el campo ha experimentado al igual que otras áreas de la industria una revolución importante, en la que las computadoras desempeñan un papel fundamental. Desde sistemas de riego automatizados, controles de temperatura y humedad automáticos para invernaderos, hasta tractores y vehículos para el campo totalmente automatizados, (Martín & Castiel, 2017), que hoy día son una realidad.

Pese a que ya existen modelos de vehículos agroindustriales automatizados, aún se están mejorando sus prestaciones, existen muchos puntos por mejorar, por ejemplo, las decisiones que toma el vehículo para llegar a su destino, ya sea por la ruta más corta o por la ruta que presenta un menor riesgo de colisión, por tales motivos se explorarán alternativas de control por modos deslizantes para resolver algunas de las problemáticas de navegación terrestre. De esta manera, se diseñó un algoritmo de control basado en la técnica del controlador de super giro para aprovechar las propiedades de convergencia en tiempo finito que conlleva el uso de este tipo de controladores, y así poder garantizar el posicionamiento en puntos específicos en el plano de forma secuencial, además se ensambló un vehículo para la ejecución de pruebas de campo.

Para el ensamble del vehículo se han utilizado componentes electrónicos cuya relación costo/beneficio es la adecuada para realizar las pruebas de la manera más precisa posible, siendo en algunos casos necesario diseñar componentes propios para que el vehículo pueda operar de forma autónoma en terrenos ásperos del campo agrícola. Asimismo, se han utilizado los controladores de fábrica del mismo, para llevar a cabo las pruebas preliminares.





Planteamiento del problema

Pese a que ya existen modelos de vehículos agroindustriales automatizados, aún se están mejorando sus prestaciones, existen muchos puntos por mejorar por ejemplo las decisiones que toma el vehículo terrestre no tripulado para llegar a su destino ya sea por la ruta más corta o por la ruta que presenta un menor riesgo de colisión, por tal motivo se explorarán alternativas de control por modos deslizantes para resolver dichos problemas. Se simularán algoritmos de control de distintos tipos y se ensamblará un vehículo terrestre no tripulado para realizar pruebas de campo.

Uno de los principales problemas en la actualidad es la falta de estudios en el área de control por modos deslizantes. Por ello es necesario seguir desarrollando aplicaciones en el área de control por modos deslizantes.

Adicional a los problemas antes mencionados se une el hecho de que las tecnologías actuales solo son accesibles para grandes productores ya que son demasiado costosas, por ello, el presente proyecto estudia alternativas de componentes y piezas que puedan reproducirse mediante impresión 3D así como recursos electrónicos de bajo costo que se encuentren vigentes en el mercado.

Los desafíos del mundo moderno implican considerar también el impacto ambiental por lo que se procurará en la medida de lo posible usar componentes reutilizables, duraderos y de preferencia reciclables.

Teniendo en cuenta lo anterior un vehículo terrestre no tripulado puede solventar una gran parte de las tareas del agricultor moderno tales como evaluación de un cultivo, aplicación de productos agroindustriales entre una gran variedad de tareas, relevando al agricultor de tareas repetitivas permitiéndole enfocarse en otras tareas de importancia.





Objetivos

Objetivo general

Puesta en marcha de un vehículo terrestre no tripulado utilizando componentes electrónicos y programas computacionales con soporte técnico vigente, con la habilidad de seguir trayectorias en tiempo finito.

Objetivos específicos

- Basarse en la teoría de control por modos deslizantes, para posteriormente ser simulado en el programa de MATLAB© simulink y ver la efectividad de dichos controladores en maniobras de posicionamiento de precisión.
- Armar y montar un vehículo terrestre no tripulado usando el programa y componentes electrónicos y mecánicos especializados para ello, para este caso se planea utilizar una placa de control Pixhawk 2.4.8 en conjunto con el programa Mission Planner© o alternativamente el programa QGroundControl© además de utilizar todos los componentes electrónicos y mecánicos adicionales. Desarrollar las piezas necesarias en caso de hacer falta mediante herramientas informáticas de diseño asistido por computadora.
- Presentar un proyecto de investigación en una conferencia nacional o internacional, mostrando los detalles de la investigación y el desarrollo del proyecto.





Justificación

El armado y el montaje del vehículo terrestre no tripulado servirá para probar la efectividad de los controladores de fábrica de la placa Pixhawk 2.4.8 así como someter a prueba un control por modos deslizantes.

Dichos algoritmos serán utilizados para llevarse a cabo en el campo agrícola de modo que puedan ser aprovechados para trabajos posteriores y futuras investigaciones en el área de los vehículos terrestres no tripulados. Asimismo, el ensamblado de un vehículo comandado a distancia y de forma automatizada, permitirá seguir realizando pruebas haciendo uso de las técnicas de control de los modos deslizantes, el vehículo en cuestión permitirá la ejecución de pruebas de componentes electrónicos y mecánicos en campo.

Dado que los vehículos no tripulados actuales son demasiado costosos se explorarán alternativas de control eficientes, económicas y sustentables, apoyando así a los productores de mediana y baja escala.

El funcionamiento y puesta en marcha de un vehículo terrestre no tripulado ayudará a entender mejor y a desarrollar aplicaciones para el campo que permitan a los agricultores mejorar el rendimiento de sus cultivos, obteniendo información precisa y en tiempo real de sus cultivos.

Las aplicaciones potenciales para los vehículos no tripulados son muy diversas y dado que la tecnología evoluciona rápidamente es recomendable estudiar continuamente las alternativas que ofrece el mercado para el control de los mismos.





Delimitación del problema

El presente trabajo de investigación se limita al análisis teórico de un controlador por modos deslizantes, así como al armado de un vehículo terrestre no tripulado.

Los componentes electrónicos y mecánicos, así como los programas utilizados para el proyecto en cuestión será el de uso comercial vigente y que cuenta con el apoyo y respaldo de una amplia comunidad de programadores a nivel mundial, para el caso de la placa de control Pixhawk 2.4.8 se utilizará en conjunto con el programa denominado Mission Planner© o alternativamente con QGroundControl©, sin embargo al ser componentes electrónicos especiales se realizarán pruebas con componentes alternos para dar un margen de tiempo oportuno a la llegada de los componentes antes mencionados.

De forma alterna se usará la placa Arduino Nano dado su bajo costo y prestaciones (que dicho sea de paso no se equiparan a las de la placa Pixhawk) por esta razón se modelará con dicha placa un vehículo prototípico para pruebas iniciales. La programación de este primer prototipo se realizará en el lenguaje de programación de Arduino y una interfaz gráfica sencilla en Python también para pruebas de laboratorio.

El prototipo final que será elaborado utilizando la placa de control Pixhawk 2.4.8 tendrá propósitos académicos y que servirá para realizar más estudios en el campo de los vehículos terrestres no tripulados.

El montaje de algún actuador sería un beneficio adicional que permitirá al operador recabar más información sobre el terreno u objetos circundantes, por ello, se tiene contemplado añadir una cámara remota que permita realizar dichas funciones





Estado del arte

Thorvald II

Uno de los robots más populares debido a sus prestaciones es Thorvald II. Se trata de un robot modular y reconfigurable que puede navegar de forma totalmente autónoma por distintos tipos de entornos tales como invernaderos, huertos y campo abierto.

Todo ello gracias a que cuenta con una inteligencia artificial avanzada que le permite al Robot tomar decisiones al mismo tiempo que recopila información para futuras interacciones con el entorno.

El modularidad del robot permite a su vez que este sea ensamblado *in situ* por ejemplo en la Figura 0-1 (Sagarobotics, 2020, párr. 4) se observa la configuración extendida la cual permite al robot desplazarse en campo abierto a través de las hortalizas, todo ello sin dañar el cultivo.



Figura 0-1 Thorvald II desplegado
Fuente: <https://sagarobotics.com/>

En la Figura 0-2 (Sagarobotics, 2020, párr. 5) se observa cómo se han contraído las extremidades del robot, esto sirve ya sea para facilitar su almacenamiento o bien su circulación en el interior de un recinto cerrado justo como en el caso de un invernadero.



Figura 0-2 Thorvald II con extremidades contraídas para operación en interiores
Fuente: <https://sagarobotics.com/>





Ya en la Figura 0-3 (Sagarobotics, 2020, párr. 7) se aprecia la amplia gama de configuraciones que pueden ser adoptadas por el robot, permitiendo al usuario elegir la más adecuada para una tarea específica.

En adición a lo anterior, es posible dotar a Thorvald II de actuadores que le permiten llevar a cabo una gran variedad de tareas tales como la recolección de frutos, aplicación de aerosoles, fumigación, análisis de cultivos, etc. Además, es completamente compatible con ROS (*Robot Operating System*) que dicho sea de paso es una plataforma gratuita para programación de robots.



Figura 0-3 Diferentes configuraciones para Thorvald II

Fuente: <https://sagarobotics.com/>

“Thorvald II puede ser configurado para la mayoría de entornos agrícolas tales como campo abierto, túneles, huertos e invernaderos. Reduce la compresión del suelo con su peso liviano.” (Sagarobotics, 2020, párr. 8)

Husky UGV

Existen además robots que pueden incorporar instrumentos de alta precisión. tal es el caso del robot Husky UGV el cual puede llevar a cabo tareas tales como polinización artificial. En la Figura 0-4 se aprecia al sistema realizando tareas de polinización, esto es posible gracias al conjunto de sensores que lleva dispuestos, en la parte superior en cuya montura se observa un LIDAR (*Light Detection and Ranging*) el cual le permite conocer las distancias con precisión entre su brazo robótico y la planta que es manipulada, pero no es el único sensor ya que además hace uso de la visión artificial para lograr el reconocimiento de las flores de la planta y así proceder con la tarea encomendada. Otra característica que llama la atención en este robot es que es operado por ROS (exactamente como en el caso del robot Thorvald II), ampliamente usado por la comunidad de programadores por lo que existe bastante soporte por parte de la comunidad. Vale la pena mencionar que este robot puede laborar tanto en entornos exteriores como interiores, pudiendo en el primer caso readaptar ruedas todo terreno para obtener una mayor tracción y de ser necesario es posible también darle una configuración





tal que tenga dirección en las cuatro ruedas. Puede ser rearmado en como un robot diferencial cambiando dos de los módulos activos por módulos pasivos de ruedas. Además, una versión de cuatro ruedas puede ser fácilmente rearmada en un robot de tres ruedas.



*Figura 0-4 Husky UGV realizando tareas de polinización
Fuente: <https://clearpathrobotics.com/>*

En palabras de la propia firma: “Husky es un diseño elegante y simple construido con materiales duraderos con muy pocas partes móviles. Su tren motriz de alto rendimiento que no requiere mantenimiento y sus grandes llantas con tacos permiten que Husky se enfrente a terrenos desafiantes del mundo real. Durará años de investigación productiva.” (Clearpath, 2020, párr. 3)

Terrasentia

Terrasentia es un robot agrícola Figura 0-5 creado por la compañía (Earthsense, 2021, 10). A diferencia de los robots anteriores este robot se enfoca principalmente en la recolección de datos de un cultivo. Algunas de las tareas importantes que puede desarrollar son el mapeo del cultivo, fenotipado, detección de plagas, detección por falta de nutrientes, medición del ancho de hojas y tallos (con una alta precisión).



Figura 0-5 Robot Earthsense





Fuente: <https://www.earthsense.co>

Este robot puede personalizarse dependiendo de las necesidades de cada agricultor, esto significa que adicionalmente TerraSentia puede llevar consigo un LIDAR, GPS, o un conjunto de cámaras RGB. Es además dinámico ya que cuenta con una inteligencia artificial que le permite aprender para mejorar así los resultados obtenidos. El tamaño compacto del sistema le permite circular entre brechas muy angostas de un cultivo sin ningún problema dadas las características de su sistema de tracción.



Capítulo 2 Capítulo Marco teórico

Enfoques teóricos de control por modos deslizantes aplicado a vehículo terrestre

La teoría de control por modos deslizantes permite la compensación de perturbaciones desconocidas y acotadas (Yuri Shtessel, 2014, pág. 72), sin embargo, dentro de la misma teoría un control del tipo Super-twisting permite lograrlo de forma continua, es decir eliminando el efecto de pestañeo (Manzanilla, y otros, 2021, pág. 21). Además, con dicha teoría se puede lograr el posicionamiento en puntos específicos del plan, debido a las propiedades de convergencia en tiempo finito (Utkin & Chang, 2002; Ferrara, Incremona, & Regolin, 2019; Liu, 2017)

A continuación, en la Figura 2-1 (a) muestra una trayectoria con convergencia en tiempo finito que va desde los puntos P_0 hasta P_5 pasando por los puntos intermedios dados (b), (c), (d), (e) hasta completarla como se muestra en (f).

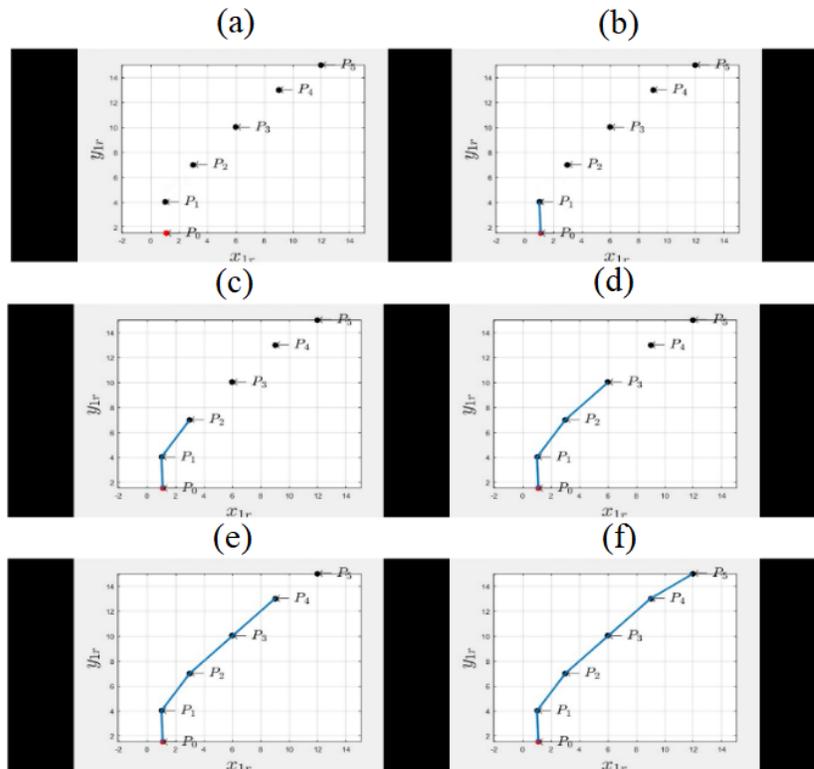


Figura 2-1 Seguimiento de una trayectoria con convergencia en tiempo finito
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Modelo cinemático del vehículo terrestre

El tipo de vehículo en cuestión es de tipo bicicleta el cual se controla desde un volante que ajusta la dirección del vehículo propiamente dicho. En el diagrama de la Figura 2-2 (x, y) representa la posición del vehículo, ϕ es el ángulo de orientación y θ el ángulo de dirección. (Salah Laghrouche, 2007, pág. 5)

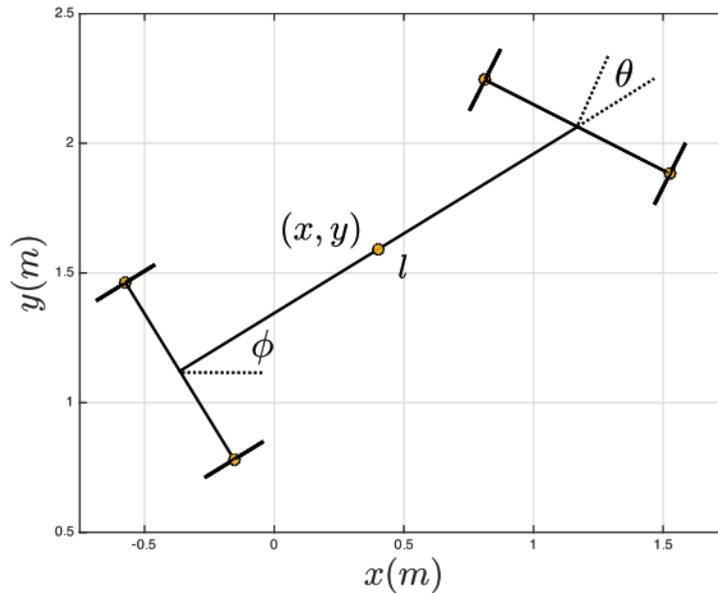


Figura 2-2 Diagrama del modelo matemático del vehículo terrestre no tripulado
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Si se escriben las ecuaciones de movimiento y dirección (Ecuaciones 2-1) para el modelo matemático entonces se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\dot{x} = v \cos(\phi) \quad a)$$

$$\dot{y} = v \sin(\phi) \quad b)$$

$$\dot{\phi} = v / \tan(\theta) \quad c)$$

$$\dot{\theta} = u \quad d)$$

Ecuaciones 2-1 Modelo cinemático del vehículo terrestre



Dinámicas del vehículo en término de los errores

En la Figura 2-3 (x_{1r}, y_{1r}) representa la trayectoria de navegación, y cada P_i es un punto específico de posicionamiento para el vehículo Rover, las Ecuaciones 2-2 muestran las dinámicas del vehículo terrestre no tripulado en función de los errores.

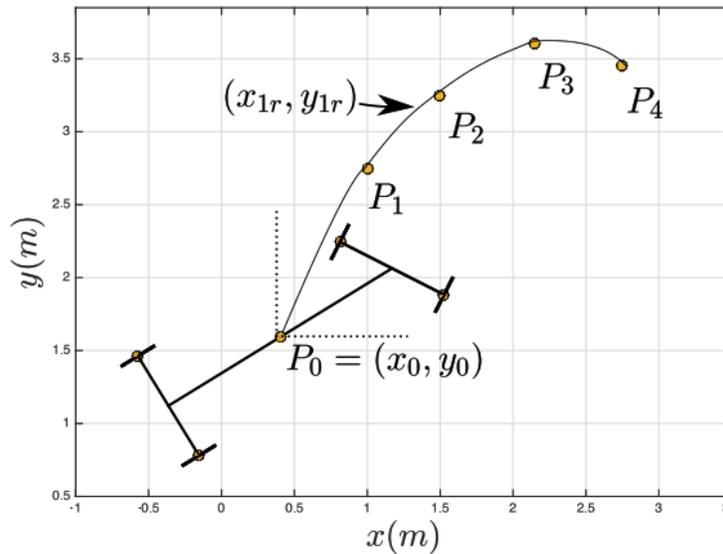
$$\dot{e}_x = v \cos(\phi) - x_{2r} \quad a)$$

$$\dot{e}_y = v \sin(\phi) - y_{2r} \quad b)$$

$$\dot{e}_\phi = \frac{v}{l \tan(\theta)} - \phi_{2r} \quad c)$$

$$\dot{e}_\theta = u - \theta_{2r} \quad d)$$

Ecuaciones 2-2 Dinámicas del vehículo en término de los errores



*Figura 2-3 Diagrama de la trayectoria con convergencia en tiempo finito
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango*

Ángulos deseados de navegación

Los ángulos deseados de navegación ϕ_{1r}, θ_{1r} así como $\dot{\phi}_{1r} = \dot{\phi}_{2r}, \dot{\theta}_{1r} = \dot{\theta}_{2r}$ son necesarios para controlar el vehículo sus dinámicas internas dependerán de cualquier trayectoria de navegación terrestre, por lo que controlar el vehículo para el seguimiento de dichos ángulos garantizará la ejecución de cualquier maniobra de navegación terrestre.





Para encontrar los ángulos de navegación deseados $\phi_{1r}, \theta_{1r}, \phi_{2r}, \theta_{2r}$ se hace un proceso de desacoplamiento de las dinámicas internas, es decir se busca eliminar la dependencia de las dinámicas de forma secuencial y facilitar el diseño de los controladores, para ello u y v se diseñan como en la Ecuaciones 2-3:

$$\begin{cases} u = V_{\theta} + \theta_{2r} & \Rightarrow \text{Control de dirección} \\ v = l \tan(\theta) (V_{\phi} + \phi_{2r}) & \Rightarrow \text{Control de velocidad lineal} \end{cases}$$

Ecuaciones 2-3 Control de velocidad y dirección

Controladores y ángulos de navegación

Primer proceso de desacoplamiento Ecuaciones 2-4

$$\dot{x} = l \tan(\theta) (V_{\phi} + \phi_{2r}) \cos(\phi) - x_{2r} \quad a)$$

$$\dot{y} = l \tan(\theta) (V_{\phi} + \phi_{2r}) \sin(\phi) - y_{2r} \quad b)$$

$$\dot{\phi} = V_{\phi} \quad c)$$

$$\dot{\theta} = V_{\theta} \quad d)$$

Ecuaciones 2-4 Primer proceso de desacoplamiento

Note que en las Ecuaciones 2-4c) y d) ya están desacopladas, solo falta desacoplar las Ecuaciones 2-4a) y b) para esto, se propone que los controles virtuales V_{ϕ} y V_{θ} estén dados por:

Ecuaciones 2-5 Controles virtuales V_{ϕ} y V_{θ} del tipo twisting

$$\begin{cases} V_{\phi} = -\rho_{\phi} |e_{\phi}|^{1/2} \text{Sign}(e_{\phi}) & |\rho_{\phi}| > 0 \\ V_{\theta} = -\rho_{\theta} |e_{\theta}|^{1/2} \text{Sign}(e_{\theta}) & |\rho_{\theta}| > 0 \end{cases}$$

Ecuaciones 2-5 Controles virtuales

Donde V_{ϕ} logra que $\phi \rightarrow \phi_{1r}$ en tiempo $t_{r_{\phi}}$, y mantener $\phi = \phi_{1r}$ para todo $t \geq t_{r_{\phi}}$.

Donde V_{θ} logra que $\theta \rightarrow \theta_{1r}$ en tiempo $t_{r_{\theta}}$, y mantener $\theta = \theta_{1r}$ para todo $t \geq t_{r_{\theta}}$.

De acuerdo a la convergencia en tiempo finito, otorgada por V_{ϕ} y V_{θ} se tiene que las Ecuaciones 2-4 convergen a:

Segundo proceso de desacoplamiento:





$$\dot{x} = l \tan(\theta_{1r})(V_\phi + \phi_{2r}) \cos(\phi_{1r}) - x_{2r} \quad a)$$

$$\dot{y} = l \tan(\theta_{1r})(V_\phi + \phi_{2r}) \sin(\phi_{1r}) - y_{2r} \quad b)$$

$$\dot{\phi} = V_\phi \quad c)$$

$$\dot{\theta} = V_\theta \quad d)$$

Ecuaciones 2-6 Segundo proceso de desacoplamiento

Ahora para el segundo y último proceso de desacoplamiento, se desea que:

$$l \tan(\theta_{1r})(V_\phi + \phi_{2r}) \cos(\phi_{1r}) = V_x + x_{2r} \quad a)$$

$$l \tan(\theta_{1r})(V_\phi + \phi_{2r}) \sin(\phi_{1r}) = V_y + y_{2r} \quad b)$$

Ecuaciones 2-7 Obtención de ángulos de navegación

Dividiendo la Ecuaciones 2-7b) entre la Ecuaciones 2-7a) se obtiene:

$$\tan(\phi_{1r}) = \left(\frac{V_y + y_{2r}}{V_x + x_{2r}} \right) \Big| \rightarrow \phi_{1r} = \tan^{-1} \left(\frac{V_y + y_{2r}}{V_x + x_{2r}} \right)$$

Ecuación 2-8 Ángulo de orientación

Por tanto, el lado derecho de la Ecuación 2-8 representa el ángulo de orientación deseado.

A continuación, se elevan al cuadrado las expresiones Ecuaciones 2-7a) y Ecuaciones 2-7b) y luego se suman obteniendo:

$$[l \tan(\theta_{1r})(V_\phi + \phi_{2r})]^2 = (V_x + x_{2r})^2 + (V_y + y_{2r})^2$$

Ecuación 2-9 Procedimiento intermedio para obtener Ángulo deseado de dirección

Entonces se obtiene que:

$$\tan(\theta_{1r}) = \frac{\sqrt{(V_x + x_{2r})^2 + (V_y + y_{2r})^2}}{l (V_\phi + \phi_{2r})} \quad a)$$





$$\rightarrow \theta_{1r} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(V_x + x_{2r})^2 + (V_y + y_{2r})^2}}{l(V_\phi + \phi_{2r})} \right) \quad b)$$

Ángulo deseado de dirección

Ecuación 2-10 Ángulo deseado de dirección

Por tanto, cuando se cumpla la convergencia en tiempo finito a las dinámicas angulares deseadas ϕ_{1r} y θ_{1r} dadas en las ecuaciones Ecuación 2-8 (lado derecho) y Ecuación 2-10b) respectivamente, el proceso de desacoplamiento estará completo y representado por:

Segundo y último proceso de desacoplamiento:

$$\dot{e}_x = V_x \quad a)$$

$$\dot{e}_y = V_y \quad b)$$

$$\dot{e}_\phi = V_\phi \quad c)$$

$$\dot{e}_\theta = V_\theta \quad d)$$

Ecuación 2-11 Segundo y último proceso de desacoplamiento, continuación.

Ahora falta diseñar los controles virtuales V_x y V_y , que son propuestos como:

Controles virtuales de posición V_x y V_y Ecuaciones 2-12.

$$\begin{cases} V_x = -\rho_x |e_x|^{1/2} \text{Sign}(e_x) & \rho_x > 0 \\ V_y = -\rho_y |e_y|^{1/2} \text{Sign}(e_y) & \rho_y > 0 \end{cases}$$

Ecuaciones 2-12 Controles virtuales de posición V_x & V_y

Donde para cada $j: x, y$ se tiene que V_j logra que $J \rightarrow j_{1r}$ en tiempo finito t_{r_j} , y mantener $j = j_{1r}$ para todo $t \geq t_{r_j}$.

Ecuaciones de los controles y ángulos deseados

Control de dirección y velocidad lineal Ecuaciones 2-13





$$\begin{cases} u = \rho_\theta |e_\theta|^{1/2} \text{Sign}(e_\theta) + \theta_{2r} & \Rightarrow \text{Control de dirección} \\ v = l \tan(\theta) (\rho_\phi |e_\phi|^{1/2} \text{Sign}(e_\phi) + \phi_{2r}) & \Rightarrow \text{Control de velocidad} \end{cases}$$

Ecuaciones 2-13 Control de dirección y control de velocidad

Ángulos deseados de navegación Ecuación 2-14.

$$\begin{aligned} \phi_{1r} &= \tan^{-1}\left(\frac{r_y}{r_x}\right) \\ \theta_{1r} &= \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}{l r_\phi}\right) \\ \dot{\phi}_{1r} &= \frac{1}{l r_\phi} \cos^2(\phi_{1r}) (\dot{r}_y - \tan(\phi_{1r}) \dot{r}_x) \\ \dot{\phi}_{1r} &= \frac{1}{l r_\phi} \cos^2(\theta_{1r}) \left(\frac{r_x \dot{r}_x}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} + \frac{r_y \dot{r}_y}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} - l \tan(\theta_{1r}) \dot{r}_\phi \right) \end{aligned} \left| \begin{aligned} r_x &= V_x + x_{2r} \\ r_y &= V_y + y_{2r} \\ r_\phi &= V_\phi + \phi_{2r} \\ \dot{r}_x &= \dot{V}_x + \dot{x}_{2r} \\ \dot{r}_y &= \dot{V}_y + \dot{y}_{2r} \\ \dot{r}_\phi &= \dot{V}_\phi + \dot{\phi}_{2r} \end{aligned} \right.$$

Ecuación 2-14 Ángulos deseados de navegación





Capítulo 3 Materiales y métodos

Modelo previo

Antes de proceder con la puesta en operación del modelo final se optó por montar un prototipo escala 1:18 el cual permitió analizar más a fondo las necesidades del proyecto.

Durante esta fase se detectó que el modelo escala 1:18 no sería fiable para las pruebas finales en campo dado su reducido tamaño y poca potencia, es por ello que se decidió utilizar un *frame* escala 1:10 de la marca Traxxas.

También se detectó la necesidad de utilizar una placa de control dedicada, por lo que se encontró como solución la placa Pixhawk dedicada a vehículos. Dicha placa cubrió una necesidad importante que de otro modo habría sido un problema con la placa Arduino Nano, ya que la placa Pixhawk 2.4.8 cuenta con 2 microprocesadores:

- 32-bit STM32F427 Cortex M4 Core con FPU
- 32 bits STM32F103

El primero de ellos es el procesador *FPU* (*Flight Processor Unit*) y el segundo que es el coprocesador a prueba de fallos.

También se mejoró el alcance del vehículo ya que a diferencia de los módulos bluetooth HC-05 de corto alcance (hasta 10m según las especificaciones del fabricante) los módulos de telemetría a 433MHz permiten un alcance cercano a 1km de distancia.



Se implementó una interfaz en Python 4.0 (Figura 0-1) para realizar pruebas preliminares en el vehículo dicha interfaz permitió realizar pruebas simples como como se muestra en sus botones, “Avanzar”, “Retroceder”, “Girar a la Izquierda”, “Girar a la derecha”. La construcción de la interfaz se realizó tomando como modelos otras interfaces Grayson, 2000 y Lutz, 2013. También debe remarcarse que Arduino no puede programarse directamente mediante el lenguaje Python por lo que se recurre a manejar la placa (Arduino Nano) a través de su puerto USB usando un programa en Python (Kolwidi, 2021).

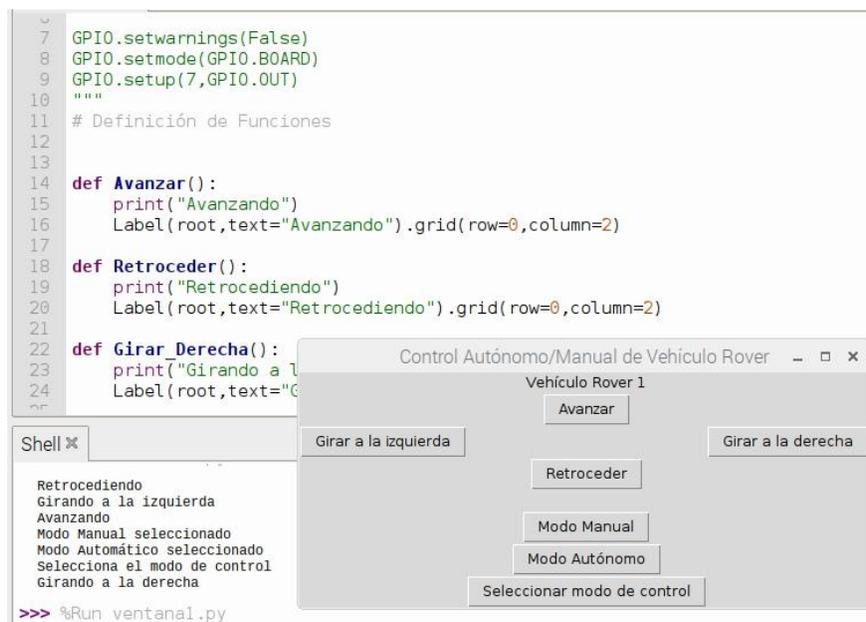


Figura 3-1 Control sencillo de pruebas desarrollado en Python
Fuente: Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

El homólogo de la placa ArduinoNano, Pixhawk ya cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario realizar estas funciones ahorrando tiempo y recursos en el desarrollo del proyecto.



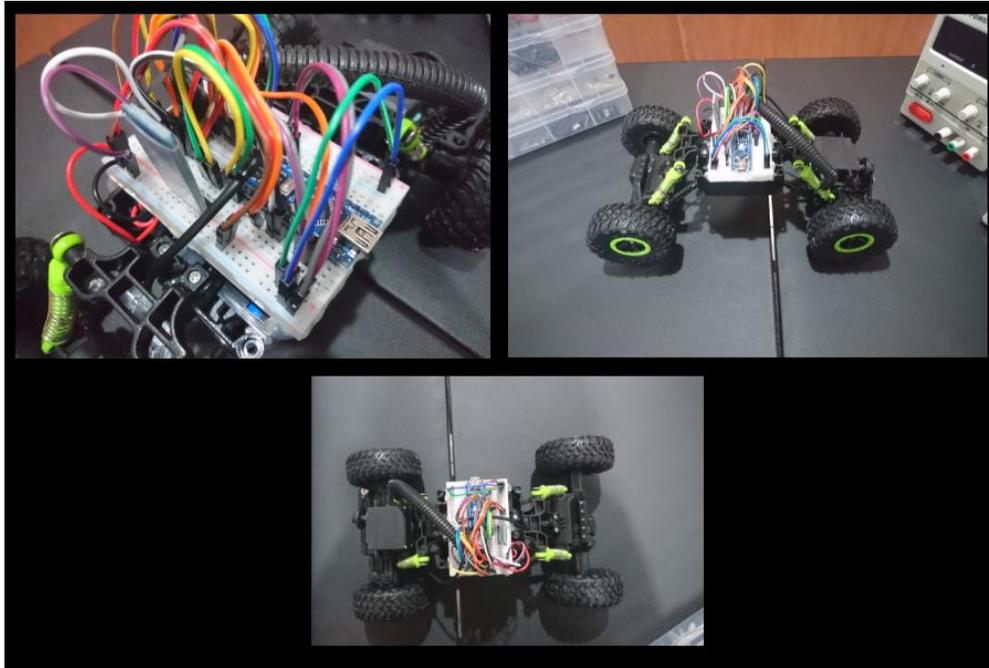


En la Figura 3-2 se muestra un fragmento del código utilizado para realizar la programación del módulo HC-05. En las siguientes páginas se describe de forma precisa en forma de tabla las especificaciones técnicas del módulo (Tabla 3-2) en la cual es importante remarcar las diferencias de voltajes, frecuencias, rangos de operación, así como el alcance contra aquellos de la Tabla 3-18 la cual describe los módulos de telemetría de 433MHz.

```
34 void listenBLE(){
35     if(Serial.available() > 0) {charBluetooth = Serial.read();
36         if(charBluetooth == '0' || charBluetooth == '1' || charBluetooth == '2
37             charBluetooth == '7' || charBluetooth == '8' || charBluetooth == '9')
38     if(informationBluetooth != "" && charBluetooth=='A'){roverRun(1,informati
39     else if(informationBluetooth != "" && charBluetooth=='B'){roverRun(2,info
40     else if(informationBluetooth != "" && charBluetooth=='C'){roverRun(0,info
41     else if(informationBluetooth != "" && charBluetooth=='D'){steeringServo.w
42 }
43
44 void setup(){
45     //Iniciamos comunicación Serial a 9600 Baudios
46     Serial.begin(9600);
47     //Se definen todos los pines de entrada y salida.
48     //Pines de control para velocidad de ejes trasero y delantero (PWM)
49     pinMode(l293_1, OUTPUT);
50     pinMode(l293_2, OUTPUT);
51     pinMode(l293_3, OUTPUT);
52     pinMode(l293_4, OUTPUT);
53     //Control de dirección (PWM)
54     pinMode(steering, OUTPUT);
55     //Se inician los objetos de las librerías
56     steeringServo.attach(steering); //Dirección
57     steeringServo.write(45); //Dirección en posición neutral
58 }
59
60 void loop(){
61     listenBLE();
```

Figura 3-2 Fragmento de código en Arduino para control de módulo Bluetooth HC-05
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

A continuación, se describen los componentes electrónicos y mecánicos del modelo previo (Figura 3-3) y algunas de las pruebas realizadas durante esta fase.



*Figura 3-3 Primer modelo del vehículo terrestre no tripulado escala 1:18 con Arduino como módulo principal de control
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango*

La Tabla 3-1 (Arduino 2021) muestra algunas de las características principales del modelo Arduino Nano, es importante remarcar las diferencias entre la placa de control Arduino Nano (Tabla 3-1) y las tablas de especificaciones técnicas de Placa Pixhawk 2.4.8 (Tabla 3-3 Procesadores de la placa Pixhawk 2.4.8, Tabla 3-4 Sensores integrados de la placa Pixhawk 2.4.8, Tabla 3-5 Interfaces de la placa Pixhawk 2.4.8, Tabla 3-6 Especificaciones eléctricas de la placa Pixhawk 2.4.8,





Tabla 3-7 Especificaciones mecánicas de la placa Pixhawk 2.4.8) ya que las prestaciones que ofrece esta segunda son superiores y la relación costo/beneficio es aceptable dadas sus diversas aplicaciones, así como sus capacidades de control debido a los sensores *in situ* que incorpora.





Tabla 3-1 Especificaciones Arduino Nano

Arduino Nano	
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación (Nivel lógico)	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (Límites)	6-20 V
Pines E/S digitales	14 (De los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógicos	8
Corriente CC por pin de E/S	40 mA
Memoria Flash	32KB (ATmega328) de los cuales 2KB son usados por el <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad del reloj	16 MHz
Dimensiones	18.6 mm x 43.2 mm

Sin embargo, las capacidades de la placa Arduino Nano son muy limitadas, por ello se verá más adelante en este documento las prestaciones de la placa de control Pixhawk que permitirá realizar una comparación a detalle de cada característica entre ambas placas.

Si se hace un balance resulta evidente que la placa de control Pixhawk supera con creces a la placa Arduino Nano, esto es porque la penúltima ha sido diseñada exclusivamente para el control de vehículos.





La (Tabla 3-2) muestra las especificaciones técnicas del módulo Bluetooth HC-05 de acuerdo con el fabricante (naylampmechatronics 2021).

Tabla 3-2 Especificaciones técnicas del módulo bluetooth HC-05

Módulo Bluetooth HC-05	
Voltaje de operación	3.6 – 6 vcd
Consumo de corriente	50mA
Bluetooth	V2.0 + EDR
Frecuencia	Banda ISM 2.4GHz
Modulación	GFSK (<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>)
Potencia de transmisión	4dBm, clase 2
Sensibilidad	-84dBm a 0.1 VER (<i>Bit Error Rate</i>)
Alcance	10m
Interface de comunicación	Serial TTL (<i>Transistor-Transistor Logic</i>)
Velocidad de transmisión	1200 bps hasta 1.3 Mbps
Tasa de baudios por defecto	38400,8,1, n
Seguridad	Autenticación y encriptación
Temperatura de trabajo	-20°C a 75°C
Compatibilidad	Android
Dimensiones	37 x 16 mm
Peso	3.6 g

El módulo bluetooth permitió la conexión al dispositivo de pruebas mediante una tableta, sin embargo, hay que mencionar la gran cantidad de problemas que esto conlleva ya que se invierten tiempo y recursos valiosos, esto no sucede con la placa Pixhawk la cual por medio de un par de módulos de telemetría (los cuales se describen más adelante) estable la conexión entre la computadora y el vehículo de manera rápida y confiable, dejando al usuario tiempo y recursos para realizar otras tareas.





Componentes electrónicos y mecánicos del vehículo terrestre no tripulado modelo definitivo

Pixhawk 2.4.8

Uno de los componentes fundamentales del vehículo es la placa Pixhawk 2.4.8 (Figura 3-4) que tiene por tarea procesar, las entradas y salidas de los sensores y actuadores del vehículo. La placa de control Pixhawk es un módulo desarrollado especialmente para el control de vehículos Mendoza et. al, 2020 sean estos aéreos, terrestres o acuáticos. Una de las ventajas que ofrece respecto a otras placas de desarrollo es su arquitectura compacta y hecha exclusivamente para vehículos, a ello se le suma que cuenta con dos procesadores uno dedicado especialmente a las entradas y salidas y otro para procesar la información general y que además funge como procesador de respaldo. En las tablas Tabla 3-3 a,



Tabla 3-7 se describen las características técnicas de la placa Pixhawk 2.4.8 (Figura 3-4).



Figura 3-4 Pixhawk versión 2.4.8
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Una de las características que hacen de Pixhawk un sistema de control muy seguro y potente es su capacidad para manejar los procesos internos y las entradas y salidas por separado. La Tabla 3-3 muestra con detalle los procesadores utilizados para ello.

Tabla 3-3 Procesadores de la placa Pixhawk 2.4.8

Procesadores	
Procesador FPU	32-bit STM32F427 Cortex M4 core con FPU
Coprocador a prueba de fallos	32 bits STM32F103

Otra de las grandes ventajas de la placa es la gran cantidad de sensores que ya incorpora. Ver Tabla 3-4.





Tabla 3-4 Sensores integrados de la placa Pixhawk 2.4.8

Sensores de a bordo	
Giroscopio	ST Micro L3GD20H 16 bit
Acelerómetro / Magnetómetro	ST Micro X4HBA 303H 14-bit
Acelerómetro / Giroscopio	Invensense MPU 6000 6-ejes
Barómetro de alta precisión	MEAS MS5607

Una de las características decisivas que tiene Pixhawk 2.4.8 se debe a la multitud de interfaces que incorpora (Tabla 3-5) (La mayoría utiliza conectores JST) y que se encuentran adaptados para su conexión a sensores y actuadores, permitiendo a los desarrolladores ahorrar tiempo dinero y esfuerzo.

Tabla 3-5 Interfaces de la placa Pixhawk 2.4.8

Interfaces	
UART (Puertos seriales)	5 (Uno de alto voltaje y dos con control de flujo)
Puertos CAN	2 (Uno con un transceptor interno de 3.3V, uno en conector de expansión)
Entrada de señal PPM	1
Entrada RSSI (PWM o voltaje)	1
Puertos I2C	1
Puertos SPI	1
Entrada de VADC	3.3 y 6.6 Volts
Interface Externa Micro USB	1
Puerto Spektrum DSM / DSM2 / DSM-X entrada compatible con receptor de satélite	1
Entrada y salida compatible con SBUS Futaba	1

Otros detalles no menos importantes son los voltajes de operación de la placa (Tabla 3-6) peso y dimensiones (





Tabla 3-7) que se tuvieron en consideración al momento de diseñar la base impresa en 3D sobre la cual yacen todos los componentes.

Tabla 3-6 Especificaciones eléctricas de la placa Pixhawk 2.4.8

Especificaciones eléctricas	
Voltaje de entrada	7V
Todas las salidas periféricas protegidas contra sobrecorriente, todas las entradas protegidas contra ESD	
Controlador de diodo ideal con conmutación por error automática	





Tabla 3-7 Especificaciones mecánicas de la placa Pixhawk 2.4.8

Especificaciones mecánicas	
Largo	81.5 mm
Ancho	50 mm
Altura	15.5 mm
Peso	38 g

Existe una amplia gama de tarjetas de control Pixhawk cada una con prestaciones distintas, siendo la versión 2.4.8. la que mejor se adapta a las necesidades del proyecto en cuestión.

Se tuvo la oportunidad de trabajar con la placa original y con una placa clon, ambas con buen desempeño, aunque se requiere de pasos adicionales para hacer trabajar los clones.

Dentro de las especificaciones mecánicas de la placa se puede comprobar su reducido tamaño por lo que puede ser montada en casi cualquier tipo de vehículo.

En las especificaciones eléctricas es posible también comprobar el bajo consumo de recursos de la misma, esto es importante para economizar en cuestiones de energía y extender la duración de la batería.

Finalmente vale la pena recalcar la importancia de la gran cantidad de interfaces que posee la placa, esto permite conectar gran cantidad de componentes adicionales y así extender las capacidades de operación del sistema.





GPS SE 100

Otro componente importante del sistema es la Unidad GPS, a pesar de la existencia de multitud de sensores GPS en el mercado se eligió el modelo SE 100 por su relación costo / beneficio. El sistema SE 100 Opera con un rango de precisión desde +/- 50cm (en modo dual) según el fabricante, no obstante, una vez que se llevaron a cabo las pruebas de campo fue posible constatar que la precisión mejora sustancialmente cuando las condiciones climáticas son adecuadas, así como un terreno llano libre de obstáculos.

La unidad se montó lo más cerca posible del centro de gravedad del vehículo. El GPS SE 100 es una alternativa fiable para pruebas de campo especialmente si es usado en un terreno llano.



Figura 3-5 Unidad GPS SE 100
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango





Los parámetros de operación de la unidad GPS se describen a continuación en la Tabla 3-8 provista por (RadioLink 2021)

Tabla 3-8 Especificaciones de la unidad GPS SE100

Tabla de parámetros	
Precisión posicional	<ul style="list-style-type: none"> • 50 cm (Modo dual) • 250 cm (Modo único)
Protocolo	NMEA
Velocidad de precisión	0.1m/s
Altura máxima de operación	50, 000 m
Velocidad máxima	515 m/s
Aceleración máxima	4G
Máxima tasa de actualización	10Hz
Sensibilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Navegación y seguimiento: -167 dBm • Adquisición: -163 dBm • Arranque en frío: -151 dBm • Arranque en caliente: -159 dBm
Periodo de activación	<ul style="list-style-type: none"> • Arranque en frío: 26 s • Arranque en caliente: 1 s
Fuente de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje: 5±5% VDC • Corriente: 50~55mA
Puertos	<ul style="list-style-type: none"> • GPS: Puerto UART con tasa de baudios de 9.6 K • Geomagnético: Puerto I2C

La ubicación del GPS en el vehículo es fundamental para su buen funcionamiento, por ello se colocó cerca del centro de gravedad, la longitud de los cables no representó mayor problema ya que pudo acoplarse a la placa de control sin extensiones ni otros componentes adicionales. La unidad GPS se colocó aproximadamente a 10cm por encima de la placa de control y el resto de componentes, esto con la finalidad de captar mejor las señales procedentes de los satélites.



Módulo de poder 90A

Dicho módulo (Figura 3-6) se encarga de distribuir la potencia de la batería. Para realizar las conexiones entre los distintos tipos de conectores se construyó un adaptador de conector tipo XRT Traxxas macho a XT60 hembra. En la Tabla 3-9 se denotan las capacidades del módulo.



*Figura 3-6 Módulo de poder de 90A
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango*

Tabla 3-9 Módulo de poder 90A

Especificaciones técnicas del módulo de poder de 90 A	
Máximo voltaje de entrada	45V
Máxima detección de corriente	90A
Salidas de conmutación del regulador	5.3V, 2.25A al máximo

La robustez del módulo de poder permite manejar grandes corrientes sin poner en peligro al resto de componentes de la unidad de pruebas.



ESC (*Electronic Speed Control*)

El módulo XL-HV (Figura 3-7) es un módulo incorporado de fábrica en el Frame del vehículo, su función es suministrar la potencia necesaria al motor principal del vehículo. El módulo de poder de 90A no tiene ningún inconveniente para manejar esta unidad ver tablas Tabla 3-10 y Tabla 3-9.



Figura 3-7 Módulo ESC XL5HV
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-10 Especificaciones del módulo ESC XL5-HV

Especificaciones	
Alimentación	<ul style="list-style-type: none">• Batería LiPo de 2s a 3s
Voltaje de entrada	11.1 v
Dimensiones de la carcasa	<ul style="list-style-type: none">• Largo: 5.54 cm• Ancho: 3.125 cm• Alto: 2.82 cm
Peso	74 g
Tipo de transistor	MOSFET
Frecuencia PWM	1700 Hz
Detección de bajo voltaje	Sí



RadioLink 2.4 GHz Traxxas

El frame incorpora ya un módulo de radiocontrol Figura 3-8 el cual permitirá conectar de forma directa un dispositivo PPM. Es importante resaltar la robustez de este dispositivo ya que la carcasa lleva un empaque el cual evita que el agua entre en la circuitería cuando el vehículo transita por terrenos inundados, por lo que es apropiado para las pruebas de campo. La Tabla 3-11, (Traxxas 2017), muestra las capacidades de este dispositivo.



Figura 3-8 Módulo de radiocontrol Traxxas Link 2.4GHz, TQi
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-11 Especificaciones del módulo Traxxas Link 6533 TQi 2,4GHz de 5 canales

Traxxas Link 6533 TQi 2,4GHz de 5 canales	
Modelo	6533
Peso	18.11 g
Dimensiones	305 x 305 x 127 mm
Frecuencia de operación	2.4 GHz
Número de canales	5

La antena del receptor se ubica en la parte media del vehículo. Pese a estar oculta no se tuvieron problemas durante la fase de pruebas de control manual.



Servomotor de dirección Traxxas

La dirección del vehículo viene a ser controlada mediante un servo (Figura 3-9), (RC Planet 2021) situado en la parte delantera del vehículo. (Servo montado en chasis) el alto torque de este servo (ver Tabla 3-12) permite rotar en terrenos ásperos como las hortalizas.



Figura 3-9 Servomotor de dirección Traxxas TRA2055 de alto torque

Tabla 3-12 Especificaciones Traxxas TRA2055 servo de alto torque (servo de dirección)

Traxxas 2055 de Alto torque	
Modelo	TRA2055
Torque	89.28g/mm
Tiempo de tránsito	0.20s/60grados
Peso	45g
Longitud	40.5mm
Ancho	20.5mm
Alto	36mm
Tipo de conector	J

El servomotor del sistema cuenta con empaques entre las uniones de su carcasa tales que permiten incluso su funcionamiento en terrenos encharcados o medianamente inundados impidiendo que el agua penetre hasta el interior. Esto es un factor importante cuando se trabaja en terrenos agrícolas.



Motor Titan 21L:

El actuador principal del vehículo (Figura 3-10) ubicado en la parte inferior del mismo es el responsable de la tracción.



*Figura 3-10 Motor Titán 21T
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango*

La Tabla 3-13 muestra las principales características del motor. El voltaje de operación no es un problema para el módulo de poder de 90 A.

Tabla 3-13 Especificaciones del motor Titán 21 T 550 con rotación inversa

Características del motor Titán 21T 550	
Vueltas	21
Voltaje de operación	14 vcd
Tipo de conectores	"Bullet"
Longitud hasta el final de la armadura	78 mm
Diámetro del cilindro	37 mm
Longitud de los cables del motor	75 mm
Diámetro de la flecha	3.175 mm

La robustez del motor adicional al control proveído por las plataformas QGroundControl® o Mission Planner® son suficientes para evitar atascos en un terreno moderadamente áspero (tal como un terreno preparado para la siembra).



Batería LiPo Turnigy 5.0

La fuente de energía del vehículo (Figura 3-11) es una batería de polímero de litio (LiPo), 11.1 vcd de 3 celdas, 5000 mAh, es también el peso de la batería (solo 412g) (Tabla 3-14) lo que la hace ideal para realizar pruebas tanto en campo como en laboratorio ya que a menor peso de los componentes mayor será la duración de la misma. El tiempo total de duración de dicha batería es de aproximadamente de media hora operando el vehículo de forma continua, lo que la hace ideal para pruebas de campo o laboratorio.



Figura 3-11 Batería de 3 celdas, Polímero de Litio (LiPo) a 11.1v, 5000mAh
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-14 Especificaciones de la batería LiPo Turnigy de 3 celdas

LiPo Turnigy 5.0	
Capacidad mínima	5000 mAh
Configuración	3S1P / 11.1v / 3Celdas
Descarga constante	25 C
Descarga pico (10 s)	30 C
Peso de la batería	412 g
Dimensiones de la batería	Largo: 146 mm Ancho: 50 mm Altura: 25 mm
Puerto de carga	JST-XH
Puerto de descarga	XT-60



Cargador Traxxas

Para cargar la batería se utiliza un cargador Traxxas EZ-Peak PLUS (Figura 3-12), el cual cuenta con distintas opciones. Por ello es importante operarlo con sumo cuidado para así evitar que se produzca un accidente ya sea al usuario o daño permanente a la batería o al cargador. La batería marca Turnigy es compatible con el cargador ver Tabla 3-14 y Tabla 3-15



Figura 3-12 Cargador Traxxas EZ Peak PLUS

Tabla 3-15 Especificaciones Traxxas EZ Peak PLUS

Traxxas EZ Peak PLUS	
AC Input	100 – 240 vca
Rango de corriente de carga	1.0 – 4.0 A (40W Máximo)
Rango de corriente de descarga	500 mAh
Drenaje de corriente para puertos equilibrados	500 mAh
Capacidad de baterías NiMH	5-8 Celdas
Capacidad de baterías LiPo	2-3 Celdas
Peso neto	365 g
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none">• Largo: 146 mm• Ancho: 123 mm• Alto: 53 mm



Servomotor MG995 Tower Pro

Permite montar un actuador en la parte superior del vehículo (en este caso se ha utilizado una cámara GoPro Hero 7) dotándolo de rotación (Figura 3-13), la velocidad de giro y torque están proporcionados por voltajes aplicados ver Tabla 3-16.



Figura 3-13 Servomotor MG995 TowerPro
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-16 Especificaciones del servomotor MG 995 Tower Pro

Especificaciones	
Modulación	Digital
Torque	<ul style="list-style-type: none"> • 4.8 V (9.4 Kg-cm) • 6.0 V (11.0 Kg-cm)
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • 4.8 V: 0.20 sec/60° • 6.0 V: 0.16 sec/60°
Peso	55 g
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • Largo: 40.7 mm • Ancho: 19.7 mm • Altura: 42.9 mm
Tipo de engrane	Metálico
Ciclo del pulso	1 ms
Tipo de conector	JR





Cámara GoPro Hero 7

Su función es capturar ya sea video o fotografía dependiendo de los requerimientos. Una cualidad importante que permite la revisión *a posteriori* del recorrido del aparato. A continuación, se anexan las especificaciones técnicas de la cámara ver Tabla 3-17 (GoPro 2021).



Figura 3-14 Cámara GoPro Hero 7 Black
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-17 Especificaciones de la cámara GoPro Hero 7 Black

GoPro Hero 7 Black	
Tamaño del sensor	1/ 2.3"
Apertura	f/2.8
Dimensiones	59 x 41 x 30 mm
Peso	<ul style="list-style-type: none">• 88 g• 152 g con la carcasa
Modos de video	<ul style="list-style-type: none">• 4K30, 2.7K60• 1440p80• 1080p120• 720p240
Formato de video	MP4(H.264)
Estabilización	No
Grabación en bucle	Sí
Resolución de imagen fija	12 MP
Ráfaga de fotos	30 FPS
Conectividad	<ul style="list-style-type: none">• Wifi• Bluetooth
Batería	Reemplazable 1160 mAh, Li-Ion
Conectores cableados	<ul style="list-style-type: none">• Mini USB• Micro HDMI
Resistencia al agua	40 m con carcasa
Pantalla táctil	Opcional



Módulos de telemetría 433MHz (Genérico)

La comunicación entre la placa de control Pixhawk y la computadora se establece mediante 2 módulos de telemetría (Figura 3-15) cuya frecuencia de operación es de 433MHz, La configuración de ambos módulos se lleva a cabo en la PC de modo que una de las antenas se conecta vía USB y la otra directamente en el puerto designado para telemetría en la placa (mencionar que dicho módulo ya cuenta con un conector hembra por lo que la conexión se puede realizar de manera directa sin adaptadores).

El alcance de operación de estos radios puede llegar a 2.5km ver Tabla 3-18 (Robo In 2021), cuando las condiciones climáticas así lo permiten, así como en un terreno llano libre de obstáculos.



Figura 3-15 Módulo en tierra 433MHz (izq.), Módulo para el Pixhawk 433MHz (der.), genéricos
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-18 Especificaciones de los módulos de telemetría de 433MHz (genérico)

Módulos de telemetría (Genérico)	
Rango	2500
Frecuencia	433MHz
Potencia nominal	500mW
Sensibilidad de recepción	-124dBm
Corriente	0.5A
Voltaje	3.6 a 7 vcd



Mando remoto Flysky fs-i6-m2

Pese a que se trata de un vehículo, todo robot debe de contar con la posibilidad de ser controlado de forma manual a distancia, de ahí la necesidad de añadir también un radiocontrol (en este caso el modelo fs-i6-m2 de Flysky), (Figura 3-16) para manipular el vehículo de manera manual en caso de ser necesaria una intervención para llevar a cabo alguna maniobra notar que la salida del control es PPM (Tabla 3-19) por lo que puede comunicarse directamente con el receptor TQi 2.4GHz sin necesidad de circuitería intermedia.



Figura 3-16 Control remoto Flysky fs-i6-m2
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-19 Especificaciones del control remoto Flysky fs-i6-m2 transmisor de 6 canales

Flysky fs-i6-m2	
Tipo del modelo	<ul style="list-style-type: none"> • Avión • Planeador • Helicóptero
Banda	142
Sistema	2.4 GHz <ul style="list-style-type: none"> • AFHDS 2A • AFHDS
Tipo de modulación	GFSK
Puerto DSC	PS2
Salida	PPM
Puerto de carga	No
Longitud de antena	26 mm (antena dual))
Actualización <i>on-line</i>	Sí
Certificación	CE0678, FCC
Memorias del modelo	20
Orden de los canales	<ul style="list-style-type: none"> • Alerón CH1 • Elevador CH2 • Acelerador CH3 • Timón CH4 • CH5 & CH6 canales abiertos para la asignación de otras funciones



Receptor Flysky FS-IA6B

En la Figura 3-17 se muestra el receptor de 6 canales Flysky fs-ia-6b dicho receptor es compatible con vehículos terrestres, aéreos y acuáticos ver Tabla 3-20.



Figura 3-17 Receptor Flysky FS-IA6B

Tabla 3-20 Especificaciones del receptor Flysky FS-IA6B

Flysky FS-IA6B	
Canales	6
Rango de frecuencia	2.4055 – 2.475 GHz
Número de ancho de banda	140
Potencia de transmisión	≤ 20 dBm
Sensibilidad del receptor de RF:	105 dBm
Modo 2.4G:	La segunda generación de una versión mejorada del sistema digital FM automático.
Codificación	GFSK
Longitud de antena	2 x 26 mm (Antena dual)
Potencia de entrada	4.0 – 8.4 vcd (2A)
Dimensiones	47 x 26.2 x 15 mm
Peso	14.9 g
Interfaz de adquisición de datos	Sí
Tipo del modelo	<ul style="list-style-type: none"> • Avión • Planeador • Helicóptero
Compatibilidad con los transmisores	<ul style="list-style-type: none"> • FS-i4 • FS-i6 • FS-i10 • FS-GT2E • FS-GT2G

Buzzer (genérico)

Pese a que las nuevas versiones ya incorporan un buzzer, en ciertas versiones hay que añadirla (Figura 3-18), pero esto no es un problema ya que dichas placas cuentan con un puerto específico para realizar su conexión.



La función del buzzer es informar al usuario las acciones que está realizando la placa por ejemplo puede indicar que el sistema está listo para operar o informar sobre errores en la carga de programas u otros malfuncionamientos, todo esto en conjunto con los LED's que ya incorpora la misma placa.

Hay que tener en cuenta que el uso del buzzer no debe omitirse ya que puede informar también sobre el estado de los actuadores y omitirlo podría ocasionar un accidente que podría derivar en daños serios para el usuario o el vehículo.



Figura 3-18 Buzzer
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Botón de *reset*

Este componente (Figura 3-19) es necesario para la puesta en marcha del vehículo por lo que al pulsarse debe ser operado con mucha precaución para evitar daños al usuario o al vehículo. Cuando el sistema está bien ensamblado Pixhawk emitirá un tono específico que indica que el vehículo puede comenzar a operar.



Figura 3-19 Botón de armado del vehículo (reset)
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Frame Traxxas Defender

A diferencia del Frame usado anteriormente (escala 1:18) este frame Figura 3-20 (Traxxas 2021) es de mayor tamaño (escala 1:10) por lo que tiene un mejor tanto en el campo como en el interior de un invernadero. Por si mismo el Frame ya cuenta con los sistemas necesarios para su funcionamiento, sin embargo, se realizaron modificaciones sustanciales para adaptar la placa de control Pixhawk 2.4.8, para realizar las adaptaciones necesarias se tomaron en cuenta los datos de las



dimensiones de la Tabla 3-21, lo mismo se hizo para realizar las adaptaciones eléctricas, electrónicas y electromecánicas correspondientes.



Figura 3-20 Traxxas Frame, vehículo tipo Rover

Tabla 3-21 Especificaciones del frame

Especificaciones	
Largo	586 mm
Ancho de la parte delantera	249 mm
Ancho de la parte posterior	249 mm
Distancia al suelo	80 mm
Peso	3.372 Kg
Altura máxima	292 mm
Distancia entre ejes	324 mm
Ángulo de aproximación	56.49°
Ángulo de salida	41.67°
Ángulo de ruptura	57°
Longitud del amortiguador frontal	90 mm
Longitud del amortiguador posterior	90 mm
Dimensiones de las ruedas frontales	49 x 26 mm
Dimensiones de las ruedas posteriores	49 x 26 mm
Dimensiones de los neumáticos frontales	118 x 48 mm
Dimensiones de los neumáticos posteriores	118 x 48 mm
Medida de la tuerca hexagonal	12 mm
Control de velocidad	XL-5 HV
Motor (eléctrico)	21 T con rotación inversa
Transmisión	Hi-Lo de 2 velocidades con cambio remoto
Paso del engranaje	32P
Tipo de diferencial	4 engranajes con bloqueo remoto
Material de la estructura	Nailon
Tipo de frenos	Electrónicos "Hill Hold"
Sistema de manejo	4WD impulsado por eje
Dirección	Servo montado en chasis
Servo	2075X Engrane de metal
Transmisor	TQi 2.4 GHz Transmisor de 4 canales
Receptor	6533
Dimensiones de la charola para batería	<ul style="list-style-type: none"> • Largo: 158.75 mm • Ancho: 47 mm • Alto: 23/26 mm





Montura de PLA para unidad GPS

Algunos de los componentes del vehículo se diseñaron con base a las medidas de otros componentes (Tabla 3-21). En este caso se diseñó una base para montar la unidad GPS SE100 (Figura 3-21) cuyas dimensiones se especifican en la Tabla 3-22.



*Figura 3-21 Base de PLA para unidad GPS
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango*



Tabla 3-22 Dimensiones del soporte para unidad GPS

Soporte para unidad GPS	
Material	PLA
Diámetro	4.5 mm
Altura total	15 mm

Plataforma de PLA para componentes del vehículo

A pesar de su compacidad, los componentes anteriormente citados ocupan un volumen, por ello se imprimió una plataforma (Figura 3-22) para colocarlos y distribuirlos acordemente a su tamaño y espacio ocupado por sus respectivos cables e interconexiones, las dimensiones de la plataforma se estipulan en la Tabla 3-23. Se utilizó el programa PrusaSlicer 2.1.1 como se muestra en la Figura 3-23. se siguieron los criterios de diseño estipulados en (Tutorial books, 2021; Dogra & Willis, 2018; Cebolla & Santoro, 2019)

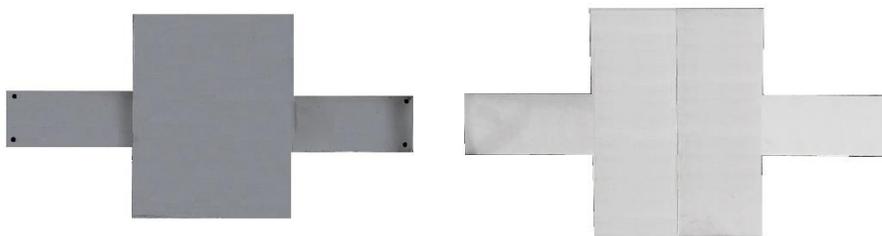


Figura 3-22 Bases de PLA para soporte de componentes electrónicos de a bordo
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

El material PLA del que están hechas las bases para los componentes es bastante resistente y ligero (ya que no son totalmente sólidas, sino que se trata de un entramado de delgados filamentos de PLA calculado por la computadora), esto permite optimizar el uso de la batería ya que de ser más pesados se tendría un mayor consumo de energía. El material PLA permite a su vez realizar operaciones sobre la superficie de las mismas tales como perforaciones o desbastado.



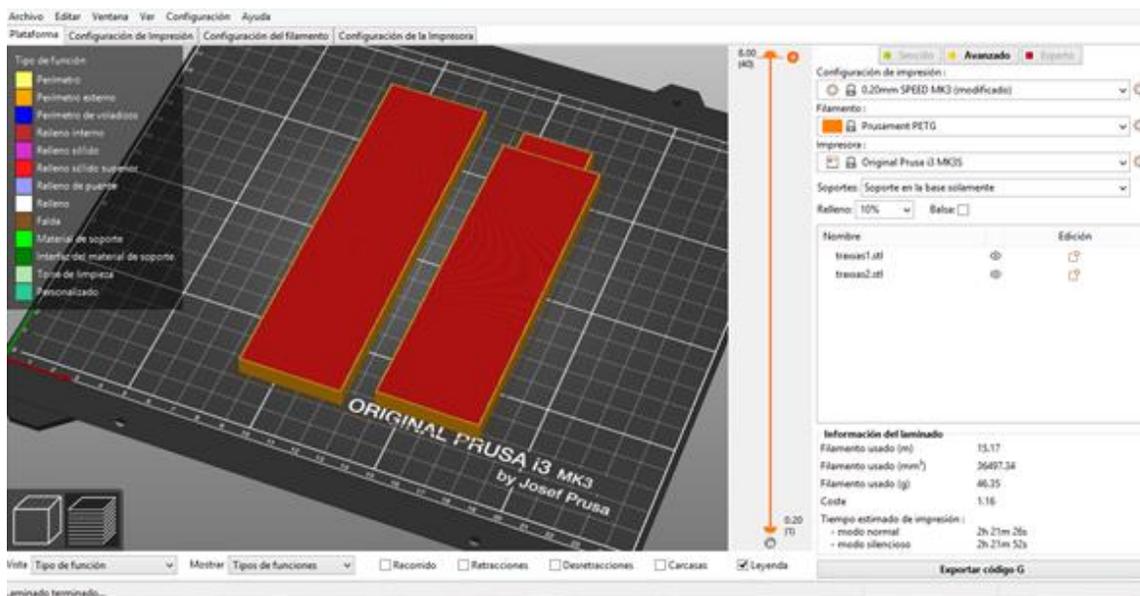


Figura 3-23 Diseño de las piezas del soporte principal para la circuitería de a bordo mediante el programa PrusaSlicer 2.1.1

Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-23 Dimensiones de la plataforma para la circuitería de a bordo

Dimensiones del soporte	
Largo	30 cm
Ancho	4.2 cm
Grosor de la parte trasera	8 mm
Grosor de la parte delantera	7.5 mm
Parte más ancha de la plataforma	12 mm
Parte longitudinal de la plataforma	15 mm
Espesor de la plataforma	8 mm

Carcasa protectora de los componentes electrónicos y mecánicos

Para proteger de la intemperie a los componentes principales tales como el Pixhawk y otros módulos, se imprimieron un par de carcasas de PLA cada una con su tapa (Figura 3-24) y además dejando espacio para los conectores de entrada/salida del sistema, ver tablas Tabla 3-24 y Tabla 3-25.



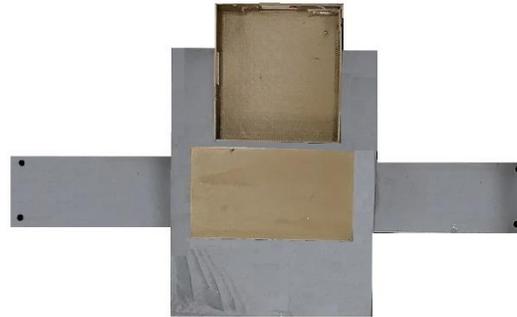


Figura 3-24 Carcasas cuadrada y rectangular para protección de componentes electrónicos
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Tabla 3-24 Carcasa cuadrada de protección de componentes

Carcasa cuadrada de protección de componentes	
Largo	10 cm
Ancho	5 cm
Alto	25 mm
Espesor	1 mm

Tabla 3-25 Carcasa rectangular de protección de componentes

Carcasa rectangular de protección de componentes	
Largo	8 cm
Ancho	8 cm
Alto	25 mm
Espesor	1 mm

Además de proteger contra la intemperie, las carcasas también protegen las tarjetas contra posibles cortocircuitos, por ello las mismas siempre se mantuvieron cerradas durante las pruebas evitando también la entrada de polvo y otras partículas nocivas para la electrónica de a bordo del vehículo.



El diagrama de la Figura 3-25 muestra las interconexiones entre los dispositivos del vehículo terrestre, así como la estación de control.

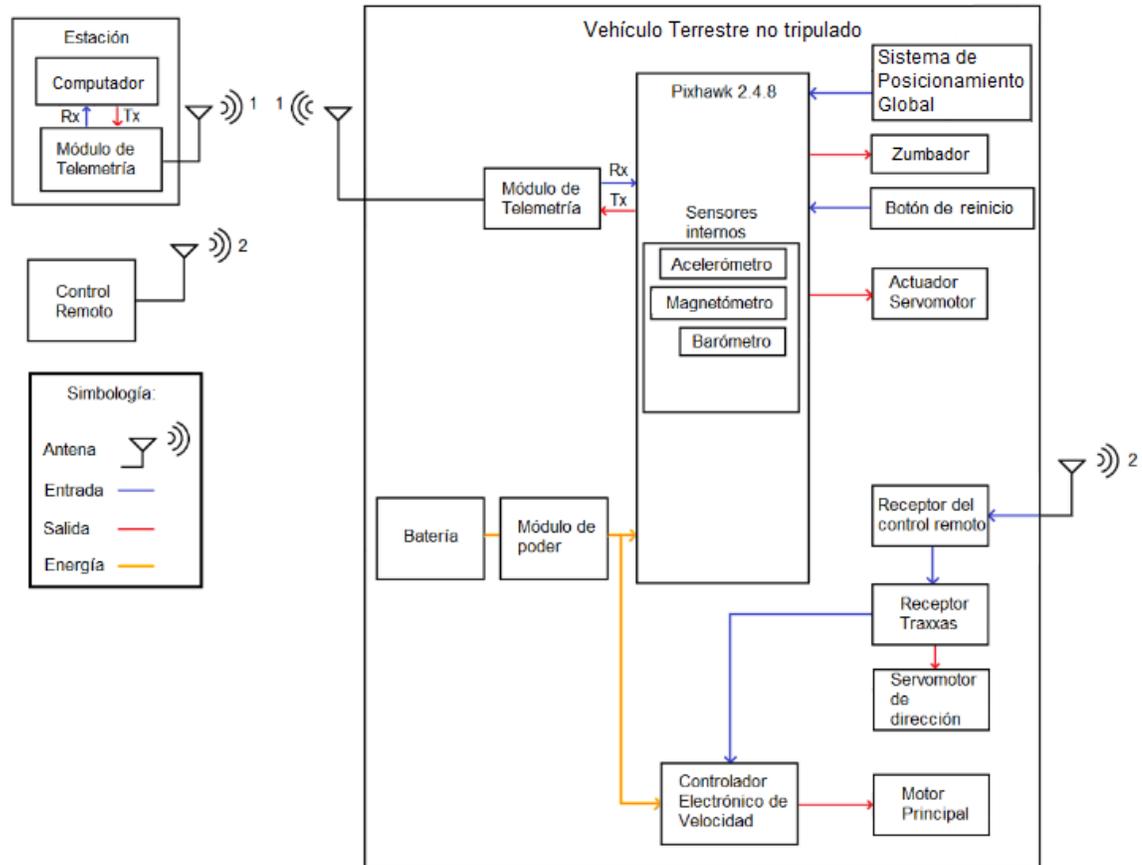


Figura 3-25 Diagrama a bloques de las conexiones del vehículo terrestre no tripulado
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Además de las interconexiones el diagrama a bloques de la Figura 3-25 muestra las entradas y salidas de cada componente. También se aprecian los 3 sensores integrados en la misma placa de control (acelerómetro, giroscopio y barómetro), las lecturas de dichos sensores pueden visualizarse en tiempo real con el programa QGroundControl© descrito más adelante.



Programación de trayectorias

Para cargar los controladores al vehículo es necesaria una herramienta informática que proporcione dichas funciones. Para las pruebas que atañen a este proyecto se utilizaron principalmente dos:

- Mission Planner©
- QGroundControl©

Las cuales se describen brevemente en las siguientes páginas.

Mission Planner©

La herramienta Mission Planner© (Figura 3-27) permite al usuario cargar los controladores del vehículo en la placa Pixhawk, dichos controladores pueden ser de fábrica o diseñados por el mismo operador, siempre es recomendable probar los controladores en simulación para evitar accidentes, así como daños al vehículo, observar que el programa Mission Planner© admite varios tipos de vehículos (Figura 3-26).



Figura 3-26 Tipos de vehículos compatibles con Mission Planner©

La versión ArduRover v2.43, se utilizó para el desarrollo de todas las pruebas de campo y laboratorio.





Figura 3-27 Interfaz principal del programa Mission Planner©

QGroundControl©

Alternativamente a Mission Planner© existe la herramienta QGroundControl© (Figura 3-28) que incorpora algunas funcionalidades adicionales al programa Mission Planner© tales como la lectura de la IMU en tiempo real.

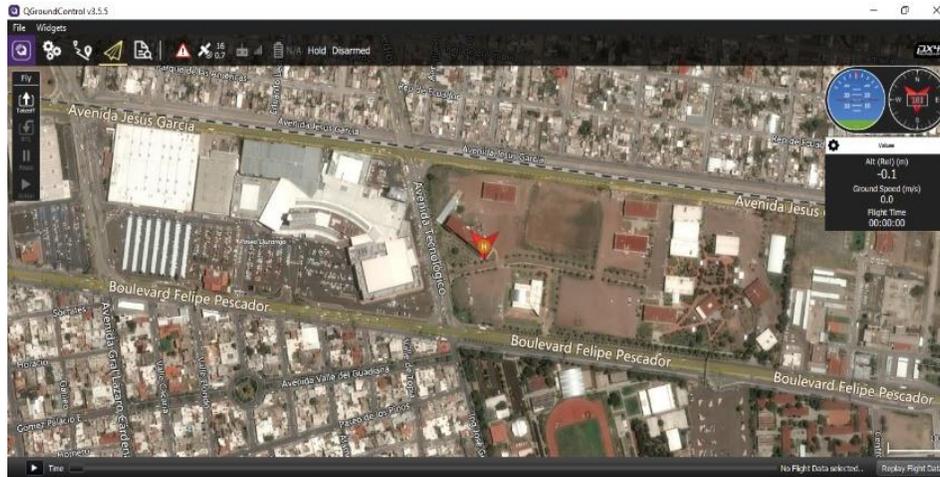


Figura 3-28 Interfaz principal del programa QGroundControl©

En la Figura 3-28 es posible apreciar el terreno (denotado por la flecha roja) donde se realizaron las primeras pruebas de los componentes.



Lecturas de la IMU en tiempo real (Figura 3-29). A diferencia del programa Mission Planner®, QGroundControl® admite la lectura de la IMU en tiempo real. Esto es útil especialmente si se desean utilizar para el control de cualquier clase de vehículo en donde las lecturas en tiempo real son cruciales para mantener dicho sistema en posición vertical con respecto al terreno.

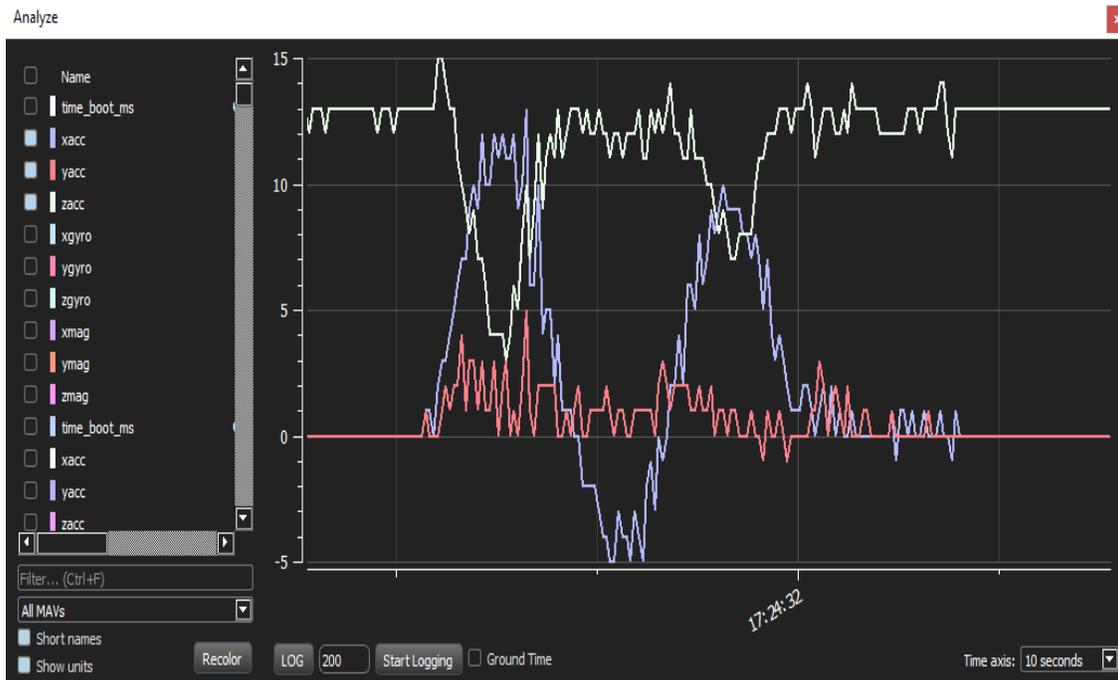


Figura 3-29 Lecturas de los sensores en tiempo real (Prueba en laboratorio)

El sensor IMU se encuentra integrado en la misma placa de control por lo que no es necesario añadirlo, esto supone un ahorro en el espacio y peso total del sistema lo que a su vez permite optimizar la batería del mismo.

Otra funcionalidad útil del programa es que permite al usuario visualizar cada eje por separado si se desea. Esto es útil cuando se prueba un programa de control en la placa.



Capítulo 4 Resultados y discusión

El vehículo ensamblado y listo para realizar pruebas se muestra en la Figura 4-1. Unidad totalmente funcional y autónoma capaz de recorrer terrenos ásperos del campo agrícola sin problemas, como resultado del ensamblaje se desarrollaron ciertos componentes como la plataforma de soporte y carcasas de protección mediante herramientas de diseño asistido por computadora.



*Figura 4-1 Vehículo terrestre no tripulado terminado
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango*





El vehículo de pruebas fue capaz de operar en campo, siguiendo las trayectorias asignadas, la Figura 4-2 muestra el vehículo en la posición inicial aún sin ninguna trayectoria definida.



Figura 4-2 Posición inicial
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

En la Figura 4-3 la trayectoria ha sido definida mediante 4 puntos por los cuales habrá de pasar el vehículo.



Figura 4-3 Programación de una trayectoria de 4 puntos
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango



En la Figura 4-4 el vehículo ha transitado sobre los puntos 1 y 2.



Figura 4-4 Inicio del recorrido, puntos 1 y 2
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

El vehículo alcanza el punto número 3 (Figura 4-5) y está listo para continuar al punto 4 y así finalizar el recorrido.



Figura 4-5 Seguimiento, punto 3
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango



Finalmente, en la Figura 4-6 el vehículo ha concluido el seguimiento de la trayectoria dada.

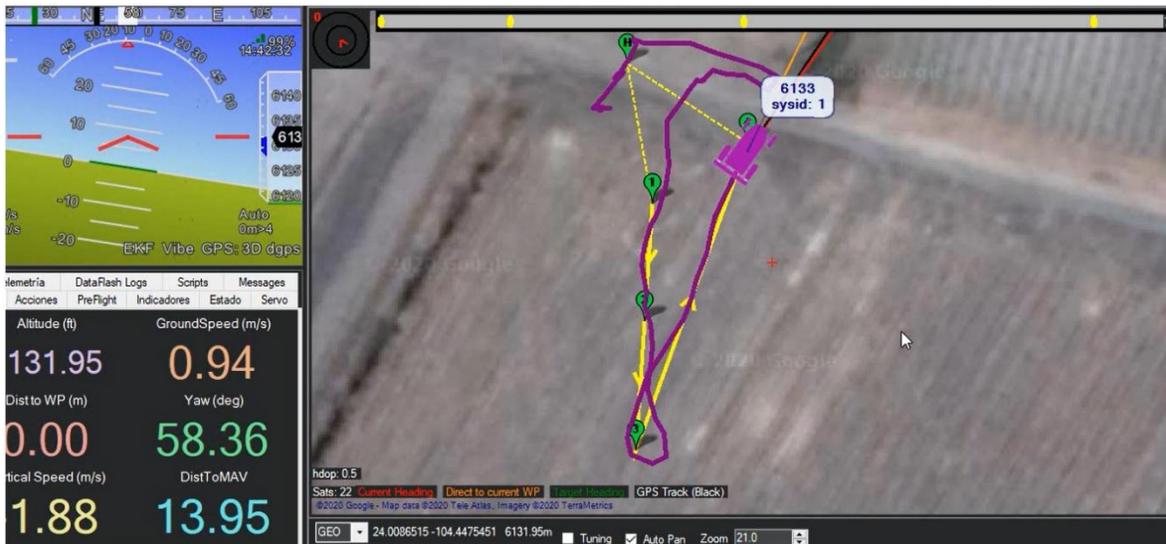


Figura 4-6 Finalización del recorrido de la trayectoria
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

El control del vehículo se realizó de manera exitosa al poder trazar trayectorias definidas mediante puntos deteniéndose en cada punto por una cantidad de tiempo previamente establecida o pudiendo sortearlos de forma continua, tomándolos únicamente como puntos de referencia por los cuales debería de circular, esto es de gran utilidad para llevar a cabo tareas en las que el vehículo debe hacer estacionario en ciertos puntos, esperando a que se complete alguna tarea asignada.

Un factor importante a tener en cuenta en los resultados es la calidad de los componentes electrónicos y mecánicos ya que tiene una estrecha relación con la calidad con que se realizan las tareas, un elemento que destaca por su calidad precio es el sistema SE100 el cual permitió recorrer las trayectorias finales especificadas con una mayor precisión, lo cual se traduce como una mayor eficiencia a la hora de realizar tareas agrícolas.

Se realizó una interfaz gráfica en Python basada en modelos previos, la cual sirvió para realizar las pruebas preliminares en el control del vehículo.

La Figura 4-7 muestra al vehículo recorriendo la trayectoria, mientras que en la imagen de la izquierda se observa el terreno en el cual es probado. Cabe mencionar que el vehículo no sufrió ningún atasco durante la etapa final de pruebas, con lo que queda demostrada su robustez.





Figura 4-7 Vehículo terrestre no tripulado recorriendo una trayectoria en tiempo finito
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango

Otro detalle importante a tener en cuenta es la unidad GPS SE100 la cual tiene una gran precisión cuando las condiciones climáticas son las adecuadas llegando a estar por encima de las expectativas de las especificaciones del fabricante.

Por último, el programa de control utilizado tanto Mission Planner© como QGroundControl© funcionan de manera adecuada, aunque ambos son programas para control de vehículos existen funcionalidades distintas entre ambos por lo que fue importante probar los dos programas para obtener el máximo provecho.

Comandos					Lat	Long	Alt	Borrar	Amb	Abajo	Grad %	Angle	Dist	AZ
WAYPOINT	0	0	0	0	24.0086024	-104.4476384	100	X	🏠	⬇️	236.7	67.1	33.2	169
WAYPOINT	0	0	0	0	24.0085069	-104.4476464	100	X	🏠	⬇️	0.0	0.0	10.7	184

Figura 4-8 Programa de la trayectoria
Fuente: UPIDET, TecNM/IT Durango





Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

El proyecto ha concluido de manera exitosa ya que se logró el objetivo principal: controlar y seguir trayectorias de manera autónoma con intervención humana mínima (limitada únicamente a tareas de supervisión). El resultado de esta investigación es útil para quienes desean desarrollar aplicaciones para el campo agrícola que permitan ahorrar tiempo, dinero y esfuerzo. Un factor importante en la elaboración del modelo final del vehículo son las cualidades de los componentes y piezas usadas ya que estas influyen directamente en la calidad de los resultados, en este caso tanto los componentes electrónicos como mecánicos han sido suficientes para la conclusión del proyecto.

El vehículo fue capaz de describir las trayectorias programadas punto a punto de forma muy precisa (Yuri Shtessel, 2014; Suárez & Vázquez, 2018).

Para futuras investigaciones se recomienda añadir componentes de visión artificial los cuales pueden ser de gran utilidad para extender las capacidades de autonomía del vehículo, dichos sistemas podrían ser cámaras, sensores LIDAR para detección y evasión de obstáculos, asimismo un sistema de visión artificial puede ser útil para la identificación de deficiencias de nutrientes en las plantas.

Sería bueno también considerar añadir actuadores adicionales tales como brazos o aspersores que pudieran tomar acciones dependiendo de las necesidades del cultivo, un ejemplo de ello podría ser un sistema de recolección que combinase un brazo mecánico con un sistema de visión artificial montados en el bastidor del vehículo.

Finalmente, como parte del desarrollo de este proyecto se tuvo en consideración los criterios del desarrollo sustentable, esto se hizo eligiendo los materiales que pudieran ser reciclados tales como las baterías entre otras piezas como los plásticos de los componentes principales (Utkin V. I., 2013).





Referencias

- Cebolla, C., & Santoro, J. (2019). *AutoCAD 2019 Curso práctico*. Ciudad de México: Ra-Ma.
- Clearpath. (2020). *Clearpathrobotics*. Recuperado el 06 de 2020, de Clearpath: <https://clearpathrobotics.com/>
- Dogra, S., & Willis, J. (2018). *Solidworks 2019 A power Guide for Beginners and Intermediate Users* (6 ed.). CADArtifex.
- Earthsense. (2021). *Earthsense*. Recuperado el 07 de 2020, de Earthsense: <https://www.earthsense.co>
- Falck, B., Falck, D., & Collette, B. (2012). *Freecad [How-To]*. Packt Publishing Ltd.
- Ferrara, A., Incremona, G., & Regolin, E. (2019). Optimization-based adaptive sliding mode control with application to vehicle dynamics control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29(3), 550-564.
- González, V. (2017). *Tecnologías bluetooth aplicadas al control de vehículos terrestres no tripulados para aspersión de agroquímicos*. Colima.
- Grayson, J. (2000). *Python and Tkinter programming*. Greenwich: Manning Publications Co.
- Hao, Y. A. (2005). Planning and control of UGV formations in a dynamic environment: A practical framework with experiments. *Robotics and Autonomous systems* 51 (2-3), 101-110.
- Herbert, M. H. (2012). *Intelligent unmaned ground vehicles: autonomous navigation research at Carnegie Mellon*. Pittsburgh: Springer Science Bussines Media.
- Laghrouche, S. P. (2007). Higher order sliding mode control based on integral sliding mode. *Automatica*, 43(3), 531-537.
- Liu, J. (2017). *Sliding Mode Control Using MATLAB*. Beijing, China: Academic Press.
- Lutz, M. (2013). *Learning python: Powerful object-oriented programming*. O'Reilly Media, Inc.
- Manzanilla, A., Ibarra Jiménez, E., Salazar, S., Zamora, Á., Lozano, R., & Muñoz, F. (2021). Super-twisting integral sliding mode control for trajectory tracking of an Unmanned Underwater Vehicle. *Ocean Engineering*, 234, 109-164.
- Martín, F. J., & Castiel, E. F. (2017). *Fitotécnia, Principios de agronomía para una agricultura sostenible* (1° ed.). Mundi-Prensa.
- Mendoza Mendoza, J. A., Gonzalez, V., Sepúlveda, G., Mendez, M., & Sossa, H. (2020). *Advanced Robotic Vehicles Programming*. Ciudad de México: Apress.
- Ortuño, J. M. (2019). *Fundamentos agronómicos*. Síntesis.
- Roldán, J. J.-R.-A. (2018). *Robots in Agriculture: State of Art and Pratical Experiences*. In Service Robots. InTech.





- Sagarobotics. (2020). *Sagarobotics*. Recuperado el 06 de 2020
- Shtessel, Y., Edwards, C., & Fridman, L. (2014). *Sliding mode control and observation* (Vol. 10). New York: Springer New York.
- Suárez, M. V., & Vázquez, A. G. (2018). *Desarrollo sustentable, Un nuevo Mañana* (2a ed.). México: Grupo editorial patria.
- Tutorial books. (2021). *FreeCAD 0.19, Learn by doing* (1 ed.). Coppell, Texas, United States of America: Tutorial books.
- Utkin, V. I. (2013). *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer Science & Business Media.
- Utkin, V., & Chang, H. (2002). Sliding mode control on electro-mechanical systems. *Mathematical problems in Engineering*, 8(4-5), 452-473.
- Yuri Shtessel, C. E. (2014). *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhäuser.





Anexos

Nomenclatura

ADC = *Analogic to Digital Converter*
AFHDS = *Automatic Frequency Hopping Digital System*
BEC = *Battery Eliminator Circuit*
BER = *Bit Error Rate*
CAN = *Controllor Area Network*
EEPROM = *Electrically Erasable Programable Read Only Memory*
ESC = *Electronic Speed Controller*
ESD = *Electrostatic Discharge*
FPU (*Flight Processor Unit*)
GFSK = *Gaussian frequency-shift keying*
GPS = *Global Positioning System*
I2C = *Inter-Integrated Circuit*
LIDAR *Light Detection and Ranging*
NMEA = *National Marine Electronics Association*
PPM = *Pulse Position Modulation*
PWM = *Pulse Width Modulation*
ROS = *Robot Operating System*
SBUS = *Serial Bus*
SMC = *Sliding Mode Control*
SPI = *Serial Peripheral Interface*
SRAM = *Static Random-Access Memory*
TTL = *Transistor-Transistor Logic*
UART = *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*
UGV = *Unmanned Ground Vehicle*

