

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Implementación de autopiloto a rover exploratorio del  
departamento de Ingeniería

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Javier Ernesto  
Archila Murillo, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2021

## Resumen

La implementación de un controlador autopiloto con capacidades de navegación semi-inteligentes en una plataforma Rover existente parte de la aplicación del conocimiento mecánico y electrónico en un ámbito físico para aplicaciones directas. El protocolo de trabajo de graduación siguiente explica el proceso de reutilización y adaptación de una plataforma de un Rover existente utilizado años anteriores en distintos proyectos para la implementación de capacidades autónomas, manuales y envío de información a través de internet gracias a los sensores presentes como de inclinación, temperatura, altura y posición, así como la capacidad de transmisión de video a través de internet o radio frecuencia (dependiendo del rango necesario y latencia mínima).

El rover exploratorio puede utilizarse en aplicaciones de alto riesgo como análisis de terrenos peligrosos (ceranos a volcanes, animales peligrosos o lugares con riesgo humano general), exploración de ubicaciones desconocidas y manipulación limitada de un objeto lejano por medio de la implementación de un brazo robótico añadido.

El autopiloto a utilizar se conoce como Pixhawk, y es el cerebro de la operación. Permite controlar todo tipo de entradas, salidas y sensores necesarios para casi cualquier aplicación, y se configura por medio de un programa llamado Mission Planner. El rover será alimentado por baterías LiPo de 24v nominales para una autonomía relativamente alta y dichas baterías serán monitoreadas para evitar una sobre descarga.

Antes de implementar lo mencionado anteriormente, se necesita realizar algunas modificaciones a la estructura existente para adaptarla a nuestra necesidad, y dichas modificaciones incluyen modernizar el diseño, reducir la altura del chasis, colocar bases para los diferentes módulos y realizar ajustes generales a las orugas.

## Antecedentes

Durante años, los vehículos no tripulados han sido de gran ayuda en aplicaciones como seguridad internacional (drones de reconocimiento aéreo), estudios de cultivos (drones de fotogrametría), fotografía aérea estructural (drones de fotografía y video) y manejo de explosivos (robots anti-explosivos terrestres). Estos vehículos permiten la recolección de información de manera segura y remota, así como la manipulación de objetos dentro o fuera del mismo rover.

El Rover más famoso actualmente es el Perseverance, el cual aterrizó en el planeta Marte en Febrero del presente año. Este rover diseñado específicamente para la aplicación realiza misiones puramente exploratorias y revelan datos importantes del planeta marciano para su estudio posterior, el cual revela características vitales de la historia del planeta.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se adquiere que la función principal de un Rover exploratorio es, efectivamente, explorar el terreno en el cual se encuentra. Pueden existir distintas categorías de Rovers, como anti explosivos, búsqueda y rescate, o incluso pilotado por una persona, y cuentan con módulos diversos para aplicaciones específicas, como recolección y análisis de muestras, toma de fotografías espectrales y reconocimiento de lugar.

En vehículos no tripulados semi-automatizados se utilizan diversos módulos que trabajan en sincronía para realizar las misiones, y en estas se necesita un autopiloto o controlador programable que sea capaz de generar las señales y realizar el procesamiento necesario para guiar automáticamente el vehículo de acuerdo al tipo de mismo, los sensores utilizados y la información programada. En la programación deben entrar variables de telemetría, las cuales incluyen factores de velocidad, tiempo, altura, inclinación, dirección y toman datos de las baterías, motores y otros sensores que pueden acoplarse como tubos de Pitot, sensores de corriente, barómetros, entre otros.

Los rovers con aplicaciones directas, como anti-explosivos, han demostrado ser de gran ayuda en minimizar riesgos a la salud humana, asegurar perímetros y explorar áreas peligrosas remotamente.

## Justificación

Un rover es una herramienta muy útil para aplicaciones que no requieran velocidad ni altura, como reconocimiento de terrenos en tierra, toma de muestras del suelo para análisis, exploración en lugares peligrosos (cerca de lava volcánica, riscos e incluso amenazas de bomba) o algo tan simple como una cortadora de grama automatizada.



El proyecto del rover exploratorio nació de otro proyecto realizado en la Universidad años atrás, donde se creó un robot destinado a limpiar la playa. Luego de que el proyecto de limpieza de playas se realizara, el rover se guardó en las instalaciones de la universidad para posteriormente ser rescatado por nuestro profesor, quien nos entregó lo que quedaba del mismo para rearmar y reutilizar. La idea inicial era crear un robot anti explosivos para la unidad anti bombas de la PNC, pero luego de que nos topamos con problemas de presupuesto y comunicación con dicha institución se decidió dejar ese proyecto por un lado y empezar uno propio utilizando la plataforma existente. El medio de movimiento de dicha plataforma son dos orugas paralelas asimilando el sistema de un tanque moderno. Este sistema cuenta con diversas ventajas como: significativamente más tracción respecto a llantas y simplicidad en sistema de giro, sin embargo no puede ser tan ágil ni rápido como un vehículo con llantas [1].



A través de este proyecto se busca construir un rover capaz de ser controlado **por control remoto** a distancia cercana y también por internet, con capacidad de tomar fotos y subirlas a la web, enviar telemetría del terreno donde se encuentra al usuario y autonomía de aproximadamente 6 horas.

Este proyecto se enfoca principalmente en la implementación y configuración de un *controlador de vuelo o autopiloto*, implementación de cámaras de transmisión de video, sensores de proximidad y sensores de telemetría general, y programar una inteligencia semi-artificial que le permita al rover detectar obstáculos imposibles de pasar, alertar al usuario y tomar decisiones por su cuenta [2].

## Objetivos



### Objetivo General

Utilizar la plataforma existente del rover disponible en la Universidad para crear un rover exploratorio con capacidades automáticas de navegación con aplicación de reconocimiento de terrenos de alto riesgo.

### Objetivos Específicos



- Utilizar el autopiloto Pixhawk para programar las funciones totales del rover en conjunto con una Raspberry Pi.
- Reutilizar la plataforma del rover proporcionado por la Universidad para convertirlo en un rover exploratorio añadiéndole capacidades autónomas y transmisión de telemetría a través de internet.



## Marco teórico

La mayor ventaja de los robots exploradores es la capacidad de acercarse, manipular y reconocer terrenos, materiales y objetos ubicados en lugares que atentan contra la seguridad de individuales, son de difícil acceso o simplemente es más conveniente enviar un rover. Esto lo realiza por medio de diversos sistemas embebidos dentro del robot, como módulos de movimiento (motores eléctricos con sus respectivos drivers y etapas de potencia), módulos de transmisión de información en tiempo real (cámaras y transmisores de video de baja latencia para controlar el robot por medio de una cámara ubicada dentro del armazón, así como telemetría de datos importantes de voltajes, corrientes o un indicador de intensidad de la señal recibida [o RSSI por sus siglas en inglés]) y módulos de potencia (baterías, reguladores de voltaje step-up o step-down y filtros de ruido electrónico), entre otros.

La capacidad de movimiento generalmente es obtenida por medio de dos orugas controladas independientemente por medio de motores eléctricos sin escobillas. Estos motores cuentan con diversas ventajas respecto a los motores comunes DC con escobillas, siendo la principal eficiencia y potencia.

Las orugas, como medio de movimiento, cuentan con ventajas y desventajas al momento de utilizarlas en un rover. Los primeros usos de las orugas fueron en carretas agrícolas, y contaban con la ventaja de tener más área superficial que generaba más tracción en superficies resbaladizas, como prados llenos de lodo [3]. Por ejemplo, la mayoría de los rovers enviados a otros planetas, si no es que todos, utilizan llantas en vez de orugas. Esto se debe a que el peso es una característica crítica al momento de viajes espaciales; una libra de peso cuesta alrededor de \$10,000 para colocar en órbita, no digamos para realizar un viaje de meses y aterrizar en otro planeta [4].

Existen diversos módulos de autopiloto que permiten realizar las funciones necesarias para este proyecto, sin embargo, el que se utilizará es el Pixhawk.

### Pixhawk

El Pixhawk 1 es una placa autopiloto avanzada que permite volver autónomo casi cualquier tipo de vehículo por medio de diferentes firmwares, y cuenta con un procesador F7 que es de los más potentes de su categoría. Esta placa cuenta con varias entradas y salidas con capacidades de comunicación SPI, PWM, I2C, MavLink y cuentan con diversos GPIO (General Purpose Input Output) para salidas y entradas digitales o análogas y un compás interno.

A este módulo se le conectarán sensores necesarios para el rover, como el GPS, sensor de voltaje y módulo de telemetría general. También irán conectadas dos salidas PWM y dos salidas digitales que se conectan al driver DC de 10A para el control de los motores por medio de un protocolo llamado "brushed with relay". Este protocolo básicamente toma la señal PWM en conjunto con una entrada digital para controlar el motor: si la entrada digital es cero, el motor gira a un lado de acuerdo al pulso variable del PWM (de 1000us a 2000us) y si la entrada digital es uno, el motor gira en sentido contrario utilizando el mismo rango PWM de 1000us a 2000us para obtener, de esta manera, más resolución de salida hacia el

motor en vez de dividir el periodo del PWM de 1000us a 1500us y de 1500us a 2000us [2].



Figura 1: Autopiloto Pixhawk 4

La programación del Pixhawk se realiza mediante un programa llamado Mission Planner, dentro del cual se descarga y sube el firmware a utilizar, se le configuran diversos parámetros para el funcionamiento correcto, se escoge el tipo de protocolo de motores a utilizar, se declaran las entradas y salidas y se programan modos de manejo a través de la conexión por control remoto.

## Driver DC de 10 A

El driver es un componente esencial para el correcto funcionamiento de los motores Dc a utilizar en en rover. Como su nombre lo indica, el driver es un controlador capaz de generar un voltaje DC invertible a partir de una entrada PWM y otra digital por motor (con capacidad de dos motores, 4 entradas en total). Este voltaje DC invertible es el que hace girar el motor de escobillas en un sentido o en otro, y el rango del mismo es de cero voltios hasta el voltaje de alimentación, que puede ser hasta 30v DC [5].

Las entradas necesarias de este driver para su funcionamiento serán salidas del Pixhawk, las cuales se configuran en Mission Planner para obtener las salidas digitales y la frecuencia PWM adecuada.



Figura 2: Driver DC de 10A de doble canal

## Sistema de transmisión de video

La transmisión de video con mínima latencia requiere de sistemas de alta potencia y velocidad, normalmente con conexión directa a través de radio frecuencia desde el emisor hasta el receptor. Existen dos tipos de video, analógico y digital.

La transmisión de video analógico es de muy baja latencia, de aproximadamente 30ms en total, sin embargo una gran limitación es el rango y la calidad, ya que dicho rango puede extenderse hasta 10 kilómetros en LOS (Line Of Sight o Línea De Visión, por sus siglas en inglés) que requiere que no se encuentre ningún obstáculo entre el emisor y el receptor, y la calidad de video llega a 360p o 480p, dependiendo de la calidad de la cámara utilizada y las antenas. Esta transmisión ocurre generalmente a una frecuencia de 5.8GHz y se utilizan antenas circularmente polarizadas para maximizar rango y cobertura radial.

El otro sistema de transmisión de video es digital, el cual utiliza dos bandas anchas de frecuencia para transmitir y recibir datos con una latencia de alrededor de 50ms y frecuencias de 2.4GHz y 5.8GHz en conjunto. Este sistema tiene un rango un poco mayor al analógico debido a la menor frecuencia utilizada, y generalmente tiene más poder de transmisión (transmisores de grado hobby hasta 1200mW). La calidad del video llega hasta 820p.



Figura 3: Sistema general de video analógico





Figura 4: Sistema general de video digital (sin antenas) (DJI Air Unit)

## Sensores de proximidad

Existen diversos sensores de proximidad con diferentes protocolos de comunicación, y los más comunes son los sensores ultrasónicos que funcionan enviando una onda de sonido inaudible para los humanos y detectando el rebote de dicha onda después de un tiempo, y de acuerdo a este tiempo que le toma a la onda rebotar y regresar se calcula la distancia hacia un obstáculo u objeto que se encuentre frente a él. Este sensor funciona por medio de comunicación serial a 9600 baudios (bits por segundo). Este sensor puede ser conectado a virtualmente cualquier microcontrolador y su programación es básica y simple.

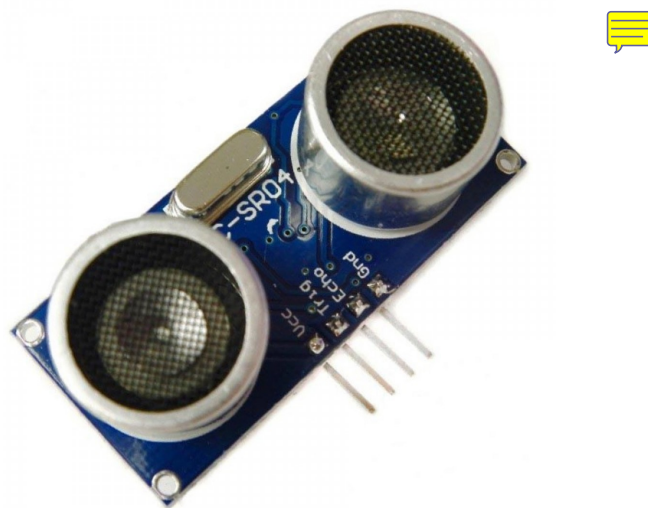


Figura 5: Sensor ultrasónico

## Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi es una computadora miniatura con una capacidad de procesamiento alta en comparación al tamaño de la misma. Es uno de los microcontroladores más famosos del mundo y cuenta con diversas entradas y salidas, así como con un sistema operativo, diferentes memorias e incluso entradas de tipo USB para conectar teclados, mouses, módems, etc. Esta computadora es versátil ya que, por el pequeño tamaño y poco peso, es móvil y de fácil uso. Utiliza el sistema operativo Linux y funciona como una computadora normal.

Esta computadora irá a bordo del rover y se encargará, a grandes rasgos, de controlar remotamente el Pixhawk y enviar la telemetría recolectada de sensores conectados a ella misma a través de internet, así como permitir un control remoto a distancia (por internet también) [6].

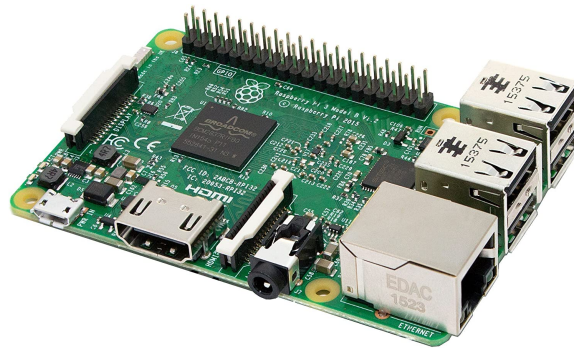


Figura 6: Raspberry Pi 3

## Mission Planner

Como mencionado brevemente, Mission Planner es una aplicación que permite la conexión y programación de microcontroladores autopiloto como el Pixhawk y sus diferentes versiones, así como otros controladores de vuelo.

Este programa facilita grandemente la configuración del rover ya que permite declarar las entradas y salidas que se tendrán presentes, el tipo de conexión a utilizar para controlar los motores, la entrada de sensores hacia él mismo y la configuración de modos de manejo (automático o manual, principalmente), creación de misiones autónomas y procedimiento a seguir en caso de pérdida de señal (FailSafe, en inglés) [7].

## Metodología

Como mencionado anteriormente, la plataforma del rover a utilizar proviene de un proyecto pasado realizado en la Universidad del Valle de Guatemala. Esta plataforma ya cuenta con la estructura principal y las orugas encargadas de la tracción, con todo el mecanismo necesario para el movimiento independiente de las mismas. Esta estructura requiere cambios para implementar el sistema de rover exploratorio, y dichos cambios a continuación se segmentan:

### Chasis o base

El chasis del rover consta de perfiles de aluminio unidos por tornillos y piezas impresas en 3D, y cuenta con una base metálica como fondo o piso. La estructura es grande y se encuentra mucho espacio interno desperdiciado, ya que todos los módulos a utilizar en el rover son pequeños y ligeros, por lo que la modificación de la estructura enfocada en un estilo más compacto y moderno es necesaria.

Dicha modificación se llevará a cabo quitando los pilares principales de la estructura y recortándolos, y de esta manera reducir la altura total de la misma al ensamblarla de regreso. Aprovechando que se desarmaría parte de la estructura, se recortaría un poco la base o el piso del rover para disminuir su área y esta se aislaría para asegurar que los circuitos eléctricos contenidos no tengan posibilidad de un corto accidental.

### Bases de motor

Anteriormente el rover utilizaba motores de limpiabrisas de carros antiguos; estos motores cuentan con bastante torque, **sin embargo** cuenta con una limitación de velocidad seria, y es que el rover actualmente tiene una velocidad máxima de alrededor de 5km/h. Estos motores cuentan con otra desventaja, y es que la tierra eléctrica de los mismos es la superficie metálica externa y solo la terminal positiva se encuentra aislada, por lo que al momento de querer invertirse la rotación, la superficie externa se vuelve positiva y el motor, al estar sujetado con tornillos al chasis, genera un corto con el otro motor que se transmite a través del mismo chasis. Resumidamente, los motores necesitan terminales aisladas a él mismo, por lo que otro tipo de motor, o una forma de aislar seguramente los motores, es necesaria.

Durante el semestre actual se realizaron pruebas de manejo, y estas necesitaron que se aislaran los motores del chasis del mismo, acción que se realizó con cinta de aislar en todas las bases y tornillos del motor. Esto no es factible a largo plazo ya que la vibración de los mismos motores puede generar un rompimiento de la cinta de aislar y generar el corto, que sería devastador para el driver de los motores, la batería y posiblemente todo el sistema eléctrico.

La solución inmediata sin aumentar la velocidad del rover es de diseñar y construir unas bases de motor aisladas al chasis del rover por medio de piezas impresas en 3D o bases de policarbonato. Lo importante es aislar la superficie externa del motor del chasis del rover.

La solución ideal es utilizar motores AC sin escobillas (o motores Brushless por su nombre en inglés) que no tienen la necesidad de conectar a tierra su superficie externa, y una característica especial de estos motores es que su enbobinado interno está aislado entre sí y hacia el entrehierro y base.

## **Cadenas**

Las orugas del rover cuentan con cadenas que encajan con sprockets, y durante pruebas de manejo realizadas es notable la desalineación de un sprocket ya que la cadena se desfasa y desencaja con frecuencia. Esta modificación requiere desarmar el sistema del lado afectado y posiblemente agregar espaciadores o alinear perpendicularmente el eje del sprocket con la oruga.

## **Colocación de baterías**

Anteriormente el rover utilizaba baterías de 12v de plomo, de aplicación para motocicleta, sin embargo por facilidad, eficiencia y capacidad, se utilizarán baterías de polímero de Litio (LiPo) de 24v. Utilizar este tipo de baterías de alto voltaje genera más eficiencia, mayor tiempo de autonomía y menor masa total sobre el rover. Se deben crear unas bases para colocar las baterías y asegurarlas dentro del mismo, así como para asegurar la conexión y que esta sea a prueba de los elementos.

## **Colocación de autopiloto y sensores**

Una gran ventaja del Pixhawk es la facilidad de instalación. Este autopiloto es un sistema embebido pequeño con carcasa plástica, y la instalación del mismo puede ser tan simple como utilizar tape de doble lado para colocarlo en la base creada o un espacio designado dentro de la estructura.

Todos los sensores, entradas y salidas que se conectan al Pixhawk cuentan con su propio conector, por lo que las conexiones del GPS, driver, sensor de voltaje y otros sensores se pueden conectar por medio de enchufes tipo servo de uno o tres pines y enchufes molex de diversa cantidad de pines.

El GPS debe ser ubicado en la parte superior de la estructura final de rover para obtener la mejor señal posible y evitar interferencia electromagnética. Dicho GPS también cuenta con un compás interno por lo que este debe ir apuntando a la nariz del rover, con la base paralela al plano horizontal del rover.

## **Programación de Pixhawk utilizando Mission Planner**

La configuración del rover en Mission Planner debe realizarse como una serie de pasos lógicos. El primer paso es configurar el tipo de vehículo a utilizar, en este caso es un rover bi motor con motores DC. Esta configuración se realiza por medio de la interfaz y consiste en

cargar un firmware a la placa con valores predeterminados y configuraciones posibles para el tipo de vehículo (no se le asignará un tipo de ala a un rover que no vuela).

La declaración de las entradas y salidas del Pixhawk se realiza en menús distintos y requiere conocer el equipo, la comunicación que utiliza y la velocidad y compatibilidad entre ellos. El GPS se activa automáticamente ya que el programa asume que se usará uno ya que es necesario para misiones autónomas. Las salidas de los motores cuentan con dos canales cada uno, y se debe declarar que el pin uno y dos son para el motor uno, donde el pin uno es la salida PWM de 1000 a 2000 microsegundos y el pin dos se declara como un pin GPIO con salida digital de valores 0-3.3v.

Se necesitan dos salidas por motor ya que el tipo de controlador de los motores funciona con el protocolo *Brushed With Relay* explicado anteriormente en el marco teórico. Luego se debe declarar el tipo de control remoto que se manejará, y este es protocolo propietario de la marca a radio control Spektrum llamado DSMX con resolución de 2048 pasos. Dicho protocolo se escoge entre los disponibles, se declara que el receptor es un satélite conectado en el pin deseado y se debe enlazar el receptor al transmisor.

Finalmente, se configuran los modos de manejo de acuerdo a un switch en el transmisor para obtener modo automático y modo manual.

## **Control de rover a través de internet**

La computadora portátil Raspberry Pi 3 que se encontrará a bordo del rover será la encargada de estar conectada siempre al Pixhawk y, por medio de un escritorio remoto, se podrán realizar cambios en la configuración del rover a través de internet, así como generación de nuevas misiones, cambio de parámetros, solución de problemas y manejo remoto por medio de internet en vez de por control de radio frecuencia. La Raspberry tendrá conectada un módem USB que será el que brinda internet al rover.

Cronograma de actividades

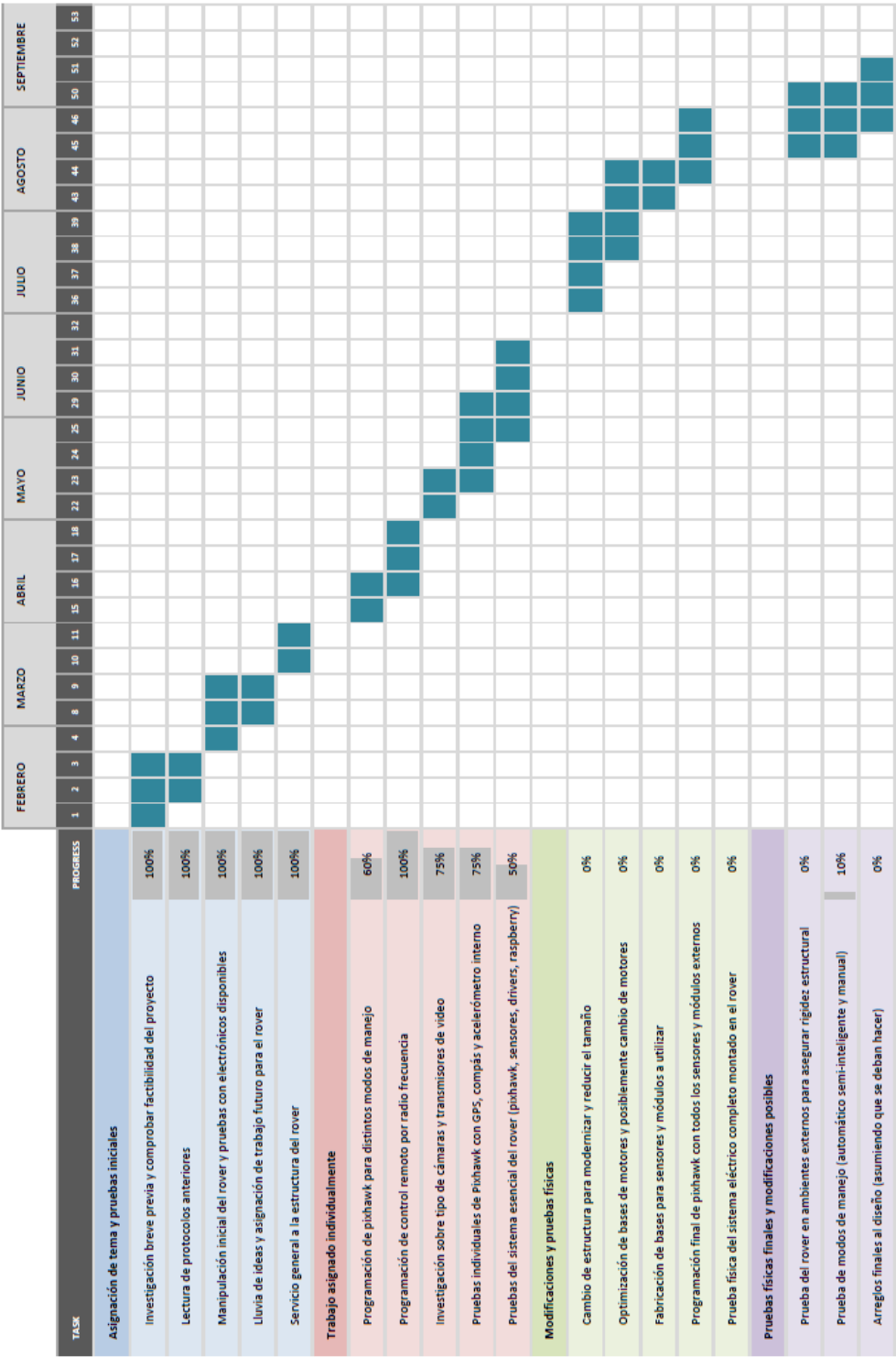


Figura 7: Cronograma de actividades

# **Índice preliminar**

## **Prefacio**

## **Lista de figuras**

## **Lista de cuadros**

## **Resumen**

## **Abstract**

## **Introducción**

## **Antecedentes**

## **Justificación**

## **Objetivos**

- Objetivo general
- Objetivos específicos

## **Alcance**

## **Marco teórico**

- Pixhawk
- Driver DC de 10 A
- Sistema de transmisión de video
- Sensores de proximidad
- Raspberry Pi 3
- Mission Planner

## **Metodología**

- Chasis o base
- Bases de motor
- Cadenas

- Colocación de baterías
- Colocación de autopiloto y sensores
- Programación de Pixhawk utilizando Mission Planner
- Control de rover a través de internet

## **Resultados**

## **Conclusiones**

## **Recomendaciones**

## **Referencias**

## **Anexos**



## Referencias

- [1] LiteTrax. (). “WHEELS VS TRACKS: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES,” dirección: <https://litetrax.com/wheels-vs-tracks-advantages-disadvantages/>. (visitado: 19.05.2021).
- [2] H. Willee. (). “Pixhawk 4,” dirección: [https://docs.px4.io/master/en/flight\\_controller/pixhawk4.html%22](https://docs.px4.io/master/en/flight_controller/pixhawk4.html%22). (visitado: 17.05.2021).
- [3] R. Beamond, “INVENTION OF THE CATERPILLAR TRACK,” 2014. dirección: <http://www.users.waitrose.com/~rogerbeamond/INVENTION.pdf>.
- [4] “Advanced Space Transportation Program: Paving the Highway to Space,” 2008. dirección: <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/astp.html#:~:text=Today%5C%2C%5C%20it%5C%20costs%5C%20%5C%2410%5C%2C000%5C%20to,per%5C%20pound%5C%20within%5C%2040%5C%20years..>
- [5] R. inc. (). “Cytron 10A 5-30V Dual Channel DC Motor Driver,” dirección: <https://www.robotshop.com/nl/en/cytron-10a-5-30v-dual-channel-dc-motor-driver.html>. (visitado: 10.05.2021).
- [6] R. P. FOUNDATION. (). “Raspberry Pi 3 Model B,” dirección: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. (visitado: 15.05.2021).
- [7] A. D. Team. (). “Mission Planner Overview,” dirección: <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>. (visitado: 19.05.2021).